

HEIKKI LUOMALA
OSSA PELTOKANGAS
TOMMI RANTALA
ANTTI NURMIKOLU

Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi



Heikki Luomala, Ossi Peltokangas,
Tommi Rantala, Antti Nurmikolu

Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015

Liikennevirasto
Helsinki 2015

Kannen kuva: Ossi Peltokangas

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-079-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Heikki Luomala, Ossi Peltokangas, Tommi Rantala ja Antti Nurmikolu: Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015. 108 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-079-7.

Avainsanat: rata, kokonaisjäykkyys, palautuva painuma, muodonmuutos, jatkuva mittaus, pohjain

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa käsitellään radan kokonaisjäykkyyden mittaamista ja modifiointia. Pääpaino tämän raportin osalta on projektissa kehitetyn jatkuvan radan jäykkyyden mittalaitteen ("Stiffmaster") ominaisuuksissa ja mittaustuloksissa sekä radan jäykkyyden modifioinnissa. Projektista on aikaisemmin kirjoitettu väliraportti "Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen", joka on julkaistu Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä sarjassa 6/2013.

Radan kuormituskestävyys on monen tekijän summa, mutta radan kokonaisjäykkyys on yksi selkeimmistä kuormituskestävyyden indikaattoreista. Tutkimuksessa kehitettiin kiskoilla työ-koneella vedettävä jatkuvasti mittaava mittalaite Stiffmaster, joka mittaa kiskon palautuvaa painumaa. Mittaustulosten avulla voidaan arvioida radan kuormituskestävyyttä. Mittalaite mittaa radan pystysuuntaisen geometrian sekä kuormitettuna että ilman kuormaa. Mittaukset tehdään samalla ajolla ja kuormana käytetään TKA7:n 140 kN painoista akselia. Radan taipuma, palautuva painuma tai kokonaisjäykkyys saadaan selville kuormitetun ja kuormittamattoman mittauksen erotuksena. Mittaus tehdään kevyiden akseleiden avulla, jotka muodostavat mitta-pisteverkon ja kuormittavat rataa vain vähän.

Mittaustulosten perusteella on havaittu raidetyypin vaikuttavan eniten palautuvan painuman suuruuteen. Puupölkkyraiteella palautuva painuma on selvästi betonipölkkyraidetta suurempi. Lisäksi ohuet rakennekerrokset lisäävät pohjamaasta peräisin olevaa palautuvaa painumaa. Useat epäjatkuvuuskohdat, kuten roikkuvat pölkkyt, kiskoatkokset ja siltapäädty näkyvät mittaustuloksissa. Sen sijaan pääraiteilla, joilla rakennekerrokset ovat paksut, pehmeiköt eivät selkeästi erotu mittaustuloksissa, mutta matalat kallioleikkaukset saattavat näkyä. Palautuvassa painumassa on vaihtelua myös pääraiteilla, mutta vaihtelu liittyy useimmiten yksittäisiin epäjatkuvuuskohtiin. Jäykkyyden muutoskohdat, kuten siltapäädty tai routalevyjen alkamiskohdat, aiheuttavat paitsi tasoeron palautuvaan painumaan, usein myös paikallisen tuennan heikkenemisen, joka näkyy suurena paikallisena palautuvana painumana ja yleensä myös geometrian heikkenemisenä. Tuennan heikkeneminen ja geometriaongelmat ovat näissä kohdissa seurausta radan joustomuutoksen aiheuttamasta liikkuvan kaluston dynaamisen kuormituksen korostumisesta. Ongelma on siten itseään kiihdyttävä ilmiö.

Radan jäykkyyden modifiointiosuudessa kuvataan menetelmiä, joilla radan jäykkyyttä voidaan muokata. Osuudessa on myös esitetty arvioita siitä, miten paljon kuhunkin rakenneseaan kohdistuva toimenpide saattaisi jäykkyyttä muuttaa. Arviot perustuvat osin tehtyihin mittaushavaintoihin, osin kirjallisuuslähteisiin ja yksinkertaisiin käsin tehtyihin laskelmiin. Selvästi suurin potentiaali jäykkyyden kasvattamisessa on vähäliikenteisten ohutrakenteisten ratojen osalta rakennekerrosten lisäämisessä, jolloin pohjamaan osuus palautuvasta painumasta vähenee merkittävästi. Sidekiskoatkokosten poistamisella voidaan vähentää jäykkyydenvaihtelua ja epätasaisuutta ratkaisevasti. Pääraiteilla huomio tulee kiinnittää jäykkyyden muutoskohtiin, kuten siltapäättyihin. Näihin paikkoihin olisi kirjallisuuslähteiden mukaan perusteltua käyttää esimerkiksi geokomposiittia muodonmuutostason pienentämiseksi tai pohjaimia palautuvan painuman tasoittamiseksi. Pohjaimilla voidaan vähentää myös runkomelua kallioleikkauksissa ja tunneleissa.

Heikki Luomala, Ossi Peltokangas, Tommi Rantala och Antti Nurmikolu: Mätning och modifiering av banans totala styvhet. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 19/2015. 108 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-079-7.

Sammanfattning

Denna studie handlar om mätning och modifiering av banans totala styvhet. Fokus i denna studie ligger på egenskaperna hos den mätutrustning ("Stiffmaster") som utvecklats för fortlöpande mätning av banors styvhet och mätresultaten samt modifiering av banors styvhet. Projektet har tidigare resulterat i mellanrapporten "Banans vertikala styvhet och punktmätning av denna", som publicerats i serien Trafikverkets undersökningar och utredningar 6/2013.

Banans belastningstålighet påverkas av många faktorer, men banans totala styvhet är en av de viktigaste indikatorerna för belastningståligheten. I studien utvecklades mätanordningen Stiffmaster som dras längs banan med en arbetsmaskin och som fortlöpande mäter skenans återhämtbara sättning. Med hjälp av mätresultaten kan man estimerar banans belastningstålighet. Mätanordningen mäter banans vertikala geometri med och utan last. Mätningarna görs under en körning och som last används axeln TKA7 med en vikt på 140 kN. Banans sättning, återhämtbara sättning eller totala styvhet erhålls som skillnaden mellan mätningen med respektive utan last. Mätningen görs med lätta axlar som bildar ett mätpunktsnät och belastar banan lite.

Enligt mätresultaten inverkar spårtypen mest på den återhämtbara sättningens storlek. På spår med träsyllar är den återhämtbara sättningen betydligt större än på spår med betongsyallar. Dessutom ökar tunna konstruktionslager den återhämtbara sättning som beror på markgrunden. Flera diskontinuitetsställen, såsom hängande syllar, skenskarvar och broändor syns i mätresultaten. På huvudbanor med tjocka konstruktionslager syns mjuka underlag inte tydligt i mätresultaten, men låga bergskärningar kan göra det. De återhämtbara sättningarna varierar också på huvudbanorna, men variationerna anknyter ofta till enskilda diskontinuitetsställen. De ställen där styvheten förändras, såsom vid broändor eller ställen där tjälskydd börjar, orsakar inte endast en nivåskillnad i den återhämtbara sättningen, utan ofta även lokal försvagning av stödet som tar sig uttryck som en stor lokal återhämtbar sättning och i allmänhet också som en försvagad geometri. Ett försvagat stöd och problemen med geometrin är i dessa fall en följd av flexibilitetsförändringen i banan som framhäver den rullande materielens dynamiska belastning. Problemet är således ett självstärkande fenomen.

I avsnittet om modifiering av banans styvhet beskrivs metoder genom vilka banans styvhet kan modifieras. Här finns också uppskattningar om hur mycket ändringar av vissa konstruktionsdelar kan ändra styvheten. Estimaten baserar sig dels på mätobservationer, dels på skriftliga källor och enkla manuella kalkyler. Den klart största potentialen när det gäller att öka styvheten hos banor med tunn konstruktion och liten trafik är att öka konstruktionslagren, varvid markgrundens andel av den återhämtbara sättningen minskar avsevärt. Genom borttagning av skenskarvar kan man avsevärt minska variationerna i styvheten och ojämnheter. På huvudbanorna bör uppmärksamhet fästas vid ställen där styvheten ändras, såsom vid broändor. Enligt de skriftliga källorna borde man på dessa ställen använda till exempel geokomposit för att minska nivån på formförändringen eller sliper-mattor för att jämna ut den återhämtbara sättningen. Med hjälp av sliper-mattor kan man även minska stombullret i bergskärningar och tunnlar.

Heikki Luomala, Ossi Peltokangas, Tommi Rantala and Antti Nurmikolu: Total track stiffness measurement and modification. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 19/2015. 108 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-079-7.

Summary

This study deals with total track stiffness measurement and modification. The main focus are the properties and measurement results of the 'Stiffmaster' rolling track stiffness measurement vehicle developed as part of this project and modification of track stiffness. An interim report titled 'Vertical track stiffness and measurement techniques' on the project was published earlier in the Research Reports of the Finnish Transport Agency 6/2013.

The load-carrying capacity of a railway track is affected by many factors, but total track stiffness is one of the most obvious indicators of it. A new rolling stiffness measurement vehicle named 'Stiffmaster' was developed to measure load-carrying capacity. The vehicle is coupled to a track maintenance locomotive to make continuous rail deflection measurements as it is pulled over the track. The vehicle measures both loaded and unloaded vertical track geometry, and deflection is determined as the difference between these two values measured during the same run. The loading consists of one axle of a Tka7 railway truck that weighs 140 kN. Three light axles are used as measurement references.

Based on the measurement results, track type affects the magnitude of deflection the most. Deflection of wooden-sleepered tracks is considerably greater than that of concrete-sleepered tracks. Moreover, the thin structural layers of low volume tracks increase deflection caused by subsoil. Many discontinuities, such as fish-plate joints and bridge approaches, can often be discerned from measurement results. On the other hand, on the main lines, where the structural layers are thicker, soft soil deposits do not stand out clearly in measurements, but shallow rock cuttings may show. Deflection varies also on the main lines, but it is usually caused by individual points of discontinuity. Sudden stiffness variations result in hanging sleepers that can be found, for example, at bridge approaches and at the points where frost insulation slabs start. Weak sleeper support and geometric problems are most likely caused by a change in track stiffness that increases the dynamic loading from rolling stock. That is a self-accelerating problem.

Several methods of track stiffness modification are described in the latter part of the report. Structural components are analysed individually and evaluations of the effects of modifications are presented. Evaluations are based on a literature review, measurement results, and simple hand calculations. The clearly best method to increase track stiffness is to add new structural layers to the substructure of low volume tracks. They reduce the loading on weak subsoil which decreases deflection. Replacing fish-plate jointed rails by continuously welded rails decreases variation in track stiffness significantly. On the main lines, the focus of modification should be on stiffness transition zones such as bridge approaches. The literature review revealed that composite materials can be used successfully to reduce deformations and maintenance need. Under sleeper pads (USP) have also been used to reduce stiffness variation. They can also be used to reduce noise and vibration in rock cuttings and tunnels.

Esipuhe

Tämä radan kokonaisjäykkyyden mittaamista ja modifiointia käsittelevä tutkimus on tehty Liikenneviraston toimeksiannosta Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana Tutkimusohjelmaa Elinkaaritehokas RATA (TERA).

Tämän raportin ovat laatineet diplomi-insinöörit Heikki Luomala, Ossi Peltokangas sekä Tommi Rantala ja työtä on ohjannut professori Antti Nurmikolu Tampereen teknillisestä yliopistosta. Työn ohjaajina tilaajan puolelta toimivat Erkki Mäkelä Liikennevirastosta ja Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä.

Helsingissä maaliskuussa 2015

Liikennevirasto
Kunnossapito-osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	RADAN KOKONAISJÄYKKYYDEN MITTAUS JATKUVATOIMISELLA MITTALAITTEELLA	11
2.1	Mittaustavan valintaperusteet	11
2.2	Mittausmenetelmän toimintaperiaate	12
2.2.1	Mitat, painot ja laskentateoria	12
2.2.2	Mittausjärjestely ja kalibrointi	14
2.3	Mittausmenetelmän rajoitukset	17
2.3.1	Mittausmenetelmän virhelähteet	17
2.3.2	Mittausten yhteys korkeuspoikkeamien määrittämiseen	21
3	MITTAUSTULOKSET LIELAHTI-YLÖJÄRVI	23
3.1	Syksymittaus	23
3.1.1	Mittausolosuhteet	23
3.1.2	Mittautulokset	23
3.2	Talvimittaus	26
3.2.1	Mittausolosuhteet	26
3.2.2	Mittautulokset	27
3.3	Mittauskertojen välinen vertailu	28
3.3.1	Koko rataosan tarkastelu	28
3.3.2	Ratarummut	29
3.3.3	Kiskoviat	31
3.3.4	Ratasillat	34
3.3.5	Kallioleikkaukset	37
3.3.6	Vaihteet	38
3.3.7	Routalevyt	39
4	GEOMETRIAN JA TAIPUMAN VÄLINEN YHTEYS	44
4.1	Radantarkastusvaunun ja jäykkyysmittalaitteen datan vertailu	44
4.2	Geometrian ja palautuvan painuman yhteys	45
4.3	Mittautulosten tulkinta Railway Doctor -ohjelmistolla	49
5	RADAN JÄYKKYYDEN MODIFIOINTIMAHDOLLISUUDET	51
5.1	Kiskot	51
5.1.1	Kiskoprofiili	51
5.1.2	Kiskojatkokset	52
5.2	Välilevy	54
5.3	Ratapölkky	58
5.4	Pohjain	59
5.4.1	Ominaisuudet	60
5.4.2	Käytön tavoitteet	62
5.4.3	Asentaminen	63
5.4.4	Pohjainten vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen	65
5.4.5	Kuormituksen jakautuminen	68
5.4.6	Radan pituussuuntaisten jäykkyyserojen pienentäminen	70
5.4.7	Ratapölkkyihin kohdistuva rasitus	72
5.4.8	Raiteen sivusuuntainen vastus	73
5.4.9	Tärinän ja runkomelun vaimennus	75
5.5	Tukikerros	76

5.6	Routalevy.....	81
5.7	Ratapenkereen vahvistaminen.....	83
5.7.1	Pohjamaan vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin.....	83
5.7.2	Alusrakenteen ja pohjamaan parantaminen.....	86
5.7.3	Geolujitteet.....	88
5.7.4	Siltapäädyt.....	91
5.7.5	XiTRACK.....	97
6	YHTEENVETO.....	101
6.1	Päätelmät.....	101
6.2	Jatkotutkimustarpeet.....	103
	LÄHTEET.....	105

1 Johdanto

Radan kuormituskestävyys on käsite, jonka tavoitteena on kuvata radan kuormituksen sietokykyä. Radan kuormat koostuvat sekä liikennekuormituksesta että ympäristökuormituksesta. Radan mitoitus on perinteisesti pohjautunut routamitoitukseen, jonka edellyttämät paksut hiekka- ja soramateriaaleja sisältävät rakennekerrokset johtavat yleensä myös kuormituskestävyyšnäkökulmasta hyvin toimivaan rataan. Jos rakenteet ovat kuitenkin ohuet, alkavat pohjamaan ominaisuudet, ja rakennemateriaalien ollessa heikkolaatuiset ratapenkereen ominaisuudet, määrätä radan kuorman-sietokyvyn. Yleisesti oletetaan, että mitä pienempiä liikennekuormituksesta aiheutu-vat palautuvat muodonmuutokset maamateriaaleissa ovat, sitä paremmin rakenne sietää myös toistokuormitusta ilman suuria pysyviä muodonmuutoksia.

Radan palautuvan painuman raja-arvot on määritelty RATO 3:ssa, mutta varsinainen radan rakennekerrosmitoitus on perustunut routamitoitukseen. Uusimmassa RATO 3:ssa junakuorman aiheuttama ratapölkyn palautuva painuma vaikuttaa penger-leveyden mitoitukseen, minkä voidaan katsoa olevan ensimmäinen askel siirryttäessä kohti kuormituskestävyyshitoitusta. Palautuva painuma tarkoittaa radan kokonais-jäykkyyttä, joka mitataan ratapölkystä pistemäisellä mittaamenetelmällä, yleisim-min kiihtyvyyssantureilla. Tässä projektissa laadittu väliraportti ”Radan pystysuuntai-nen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen” pureutuu pistemäisiin mittaus-menetelmiin ja niillä saatuihin kenttämittaustuloksiin (Peltokangas et al. 2013). Pis-temäisissä mittauksissa havaittiin muun muassa, että pohjamaan ominaisuudet vai-kuttavat kokonaisjäykkyyteen eniten. Tämän lisäksi tukikerroksen tukeutumistilan-teella on suuri vaikutus yksittäisen ratapölkyn palautuvaan painumaan. Mittauksissa havaittiin yksittäisiä huonosti tuettuja tai roikkuvia ratapölkkyjä, jotka pienentävät kokonaisjäykkyyttä paikallisesti.

Pistemäiset mittausmenetelmät eivät ole riittävän tehokkaita käytettäväksi koko rata-verkolla ja laaja-alaista mittaamista varten tarvitaan jatkuvatoiminen radalla liikkuva mittalaite. Tässä raportissa kuvataan projektissa kehitetty jatkuvatoiminen jäykkyy-den mittalaite ja sen mittaamia tuloksia Lielähti–Ylöjärvi-rataosalta. Raportin valmis-tumiseen mennessä mittauksia on tehty jo useilla erityyppisillä rataosilla ja näistä poimintoja on esitelty radan jäykkyyden modifiointiosuudessa. Mittaustuloksia käsi-tellään hyvin yleisellä tasolla ja tarkastelussa on tavoitteena havainnollistaa millaisia jäykkyydsvaihtelut ovat ja missä niitä ilmenee. Toisaalta tarkastellaan mittalaitteen toimintaa erityyppisissä tilanteissa.

Luvussa 2 esitellään jatkuvatoiminen mittalaite, joka on saanut nimekseen Stiffmas-ter. Luvussa kuvataan mittalaitteen toimintaperiaatteen valintaan johtaneita seikkoja, mutta pääpaino on mittalaitteen toimintatavan ja ominaisuuksien kuvaamisessa. Myös mittausmenetelmän havaittuja virhelähteitä on käsitelty kattavasti.

Luvussa 3 käsitellään mittaustuloksia Lielähti–Ylöjärvi-rataosalta. Mittaukset on tehty sekä syksyllä että talvella ja mittaustuloksia verrataan toisiinsa. Ratapurkista on ha-ettu kaikki löytyvä tieto radassa olevista rakenteista ja yhdessä maatutkatulkinnan kanssa on yritetty muodostaa ymmärrys mittaustuloksista. Koska kyseessä on uusi mittausmenetelmä, mistä ei ole entuudestaan saatavilla vertailukohtaa, ymmärryksen muodostamiseen on pyritty epäjatkuvuuskohtien aiheuttamien muutosten kautta.

Luvussa 4 palautuvan painuman mittaustuloksia verrataan radan korkeuspoikkeamiin. Aluksi on tehty vertailu Stiffmasterin mittaaman korkeuspoikkeaman ja virallisen radantarkastusvaunu EMMAn mittaaman korkeuspoikkeaman kesken. Monestakaan syystä näiden mittaustulosten ei pitäisi täysin vastata toisiaan, mutta vertailu osoitti, että korrelaatio on riittävä, jotta Stiffmasterin mittaamaa korkeuspoikkeamaa voidaan käyttää analyysissä. Tästä oli selkeää etua, sillä mittaustulokset ovat samassa tiedostossa numeerisena ja täsmälleen samassa koordinaatistossa, vaikka absoluuttisissa koordinaateissa olisikin epätarkkuutta.

Luvussa 5 käsitellään radan jäykkyyden modifiointitekniikoita ja kuvataan radan eri komponenttien vaikutusta radan kokonaisjäykkyyteen osin case-esimerkkien avulla. Osio koostuu erilaisissa kohteissa tehdyistä mittaushavainnoista sekä kirjallisuudesta tehdyistä havainnoista. Lisäksi kootun tiedon perusteella on haarukoitu eri toimenpiteiden vaikutusta radan kokonaisjäykkyyteen.

2 Radan kokonaisjäykkyyden mittaus jatkuvatoimisella mittalaitteella

2.1 Mittaustavan valintaperusteet

Tämän tutkimusprojektin väliraportissa (Peltokangas et al. 2013) on kuvattu radan kokonaisjäykkyyden mittausmenetelmiä, joita käytetään eri maissa maailmalla. Ne voidaan jakaa toimintaperiaatteeltaan kahteen ryhmään kuormituksen tuottamisen perusteella: radalla liikkuvan kaluston aiheuttama palautuva painuman mittaus (todellinen kuorma) ja oskilloivan massan aiheuttaman palautuvan painuman mittaukseen perustuviin menetelmiin (oskilloiva kuorma). Todellisen kuorman mittaamiseen perustuvissa mittaustavoissa kiskon korkeusasema mitataan sekä kuormitettuna että ilman kuormaa ja radan kokonaistaipuma lasketaan näiden kahden mittauksen erotuksena. Kuormittava akseli on kalustoyksikön akseli, jonka akselipaino on tunnettu ja joissakin tapauksissa akselipaino on myös säädettävissä erillisen kuormitusjärjestelyn avulla. Oskilloivaan kuormaan perustuvissa mittaustavoissa kuorma vaihtelee tietyllä taajuudella ja vaihteluvälillä ja radan kokonaistaipuma mitataan kiihtyvyyssanturien avulla.

Periaatteellinen ero eri mittausmenetelmien kuormituksessa on merkittävä, vaikka sen ei pitäisi teoriassa vaikuttaa suuresti itse mittaustulokseen. Todelliseen kuormaan perustuvassa mittauksessa kuormitus vastaa hyvin junakuormaa, mutta kuormituksen säädeltävyys on rajoitettu. Oskilloivaan kuormaan perustuvissa menetelmissä kuormituksen säätely on hyvin vapaata, mutta kuormitus eroaa ainakin jossain määrin todellisesta kuormituksesta vaikka mittauksessa on mukana myös juna-kuorman omainen komponentti. Perustavaa laatua oleva kysymys on myös se, mikä kuormituksen vaihteluvälin tulisi olla. Yhtäältä on perusteltua, että kuormitus alkaa nolasta ja päättyy tiettyyn akselipainoon. Tällöin kaikki radan ominaisuudet tukeutumistilanteesta pohjamaahan tulevat mukaan tarkasteluun. Toisaalta kuormitus voisi alkaa vasta tietyn tukeutumiskuorman jälkeen päättyen tiettyyn akselipainoon. Tällä tarkastelutavalla saataisiin paremmin selville penkereen ja pohjamaan ominaisuuksia. Yksi tarkastelutapa voisi olla käyttää ainoastaan kuormaa nolasta tukeutumiskuormaan, jolloin tarkastelussa olisi lähinnä tukikerroksen tuentatila. Mittaustavasta riippumatta erilaiset kuormitukset vaativat oman mittaussajon, joten menetelmän valinta ei kokonaan rajaa eri kuormitusvälejä tarkastelun ulkopuolelle vaikkakin säädeltävä kuormitus olisi helpompaa toteuttaa oskilloivaan kuormaan perustuvassa mittaussajon menetelmässä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli rakentaa toimiva jatkuvatoiminen mittaussäätely tiettyjen rajallisten resurssien avulla. Tästä syystä mittaussäätelyn tuli olla kohtalaisen yksinkertainen ja helposti toteutettavissa oleva. Lisäksi ainakin aluksi vain tutkimuskäyttöön tulevan laitteen tuli olla kohtalaisen helposti liikuteltavissa eri tutkimuskohteiden välillä. Teknisessä mielessä todelliseen kuormaan perustuvat mittaustavat vaikuttivat yksinkertaisemmilta toteuttaa, sillä niissä kuormitus voidaan tuottaa esimerkiksi radalla liikkuvan työkonen avulla eikä erillistä kuormituslaitteistoa tarvita. Muut mittaaukseen tarvittavat laitteet painavat kohtalaisen vähän ja niitä pystytään liikuttamaan tarvittaessa pakettiautolla radan ulkopuolella. Näillä reunaehdoilla päädyttiin rakentamaan todelliseen kuormaan perustuva laite, joka muistuttaa ulkoisesti Sveitsissä käytössä olevaa laitetta, mutta on akselirakenteeltaan yksinkertaisempi.

Toinen tapa päästä helposti käsiksi mittaustuloksiin olisi ollut vuokrata toimiva laite ulkomailta, mutta tämä vaihtoehto kaatui käytännössä Suomen erityispiirteeseen rai-deleveyden suhteen.

2.2 Mittausmenetelmän toimintaperiaate

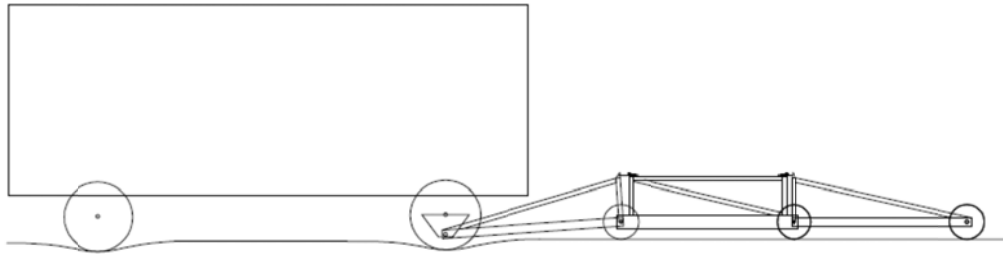
2.2.1 Mitat, painot ja laskentateoria

Jatkuvatoimisen radan jäykkyyden mittalaitteen toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen sekä kuormittamattomasta että kuormitetusta radasta. Mittalaite koostuu kolmesta kevyestä akselistä, jotka mittaavat radan pystysuuntaisen geometrian ensin kalustoyksikön tuottaman akselikuorman alaisena ja tämän jälkeen kuormittamattomana. Radan taipuma saadaan selville näiden kahden mittaustuloksen erotuksena ja edelleen radan kokonaisjäykkyys johdetaan määrittäytystä taipumasta eli palautuvasta painumasta.

Mittalaitteen mitat määräytyvät käytettävän akselivälin mukaisesti. Mittavaunun akseliväliksi valittiin 3 metriä, minkä arvioitiin laskennallisesti olevan riittävän pitkä, jotta raskaan akselin aiheuttama taipuma ehtii palautua ennen kevyttä akselia. Laitteen kokonaispituudeksi tuli siten 9 metriä ja korkeudeksi noin 1,3 metriä. Laitteen korkeuteen vaikuttivat pyörän halkaisija ja laitteen rakennekorkeus. Laitteen rungon muodosta tehtiin kolmio, jotta siitä saataisiin mahdollisimman kevyt ja jäykkä. Rakennekorkeutta tarvittiin myös varsinaisen mittauksen takia, sillä mittauksen tarkkuus kasvaa rakennekorkeuden suhteessa. Pyörän halkaisijaksi valittiin 500 mm, sillä se täyttää liikkuvan kaluston minimivaatimukset (halkaisija ≥ 400 mm) (RATO 21, taulukko 21.5:1).

Ensimmäisessä prototyypissä pyörissä oli erillislaakerointi, joka mahdollisti pyörien vaihtamisen kumipyöräksi ja laitteen liikuttamisen ja testaamisen myös tiellä. Aluksi myös pyöräprofiilin muodossa oikaistiin sorvaamalla S1002-profiilin sijasta suora kartio. Vaihteissa tehtyjen mittausten perusteella havaittiin, että pyörän erillislaakerointi ja yksinkertaistus pyörän muodossa vaikutti liikaa kulkuominaisuuksiin eikä laitetta voitu työntää turvallisesti ilman suistumisvaaraa. Tästä syystä laitteesta rakennettiin toinen prototyyppi, jossa käytettiin virallista Suomessa käytössä olevaa S1002 pyöräprofiilia ja kiinteää akselia. Mittalaitteesta pyrittiin tekemään mahdollisimman kevyt ja lopulliseksi akselipainoksi tuli hieman akselistä riippuen 2–3 kN.

Mittalaite kiinnitetään mittausta varten haluttuun kalustoyksikköön jousittamattomaan massa akselin alapuolelle (Kuva 2.1). Raskas akseli kuormittaa rataa aiheuttaen siihen taipuman, jonka suuruusluokka on hyväkuntoisella radalla tavallisesti 1–3 mm kiskon kulkupinnalta mitattuna. Mittausvaunun kaksi ensimmäistä akselia toimivat referenssipisteinä määritettäessä radan kuormitettu pystysuuntainen geometria. Kuormittamaton geometria määritetään vastaavasti mittausvaunun ensimmäisen akselin suhteen toisen ja kolmannen akselin toimiessa referenssipisteinä. Näin saadaan aikaiseksi kaksi suhteellista korkeusviivaa, jotka on mitattu akselivälin pituuden verran eri kohdissa rataa ajan suhteen tarkasteltuna. Tästä syystä mittaustulokset sidotaan keskenään tarkasti paikkaan, mikä tehdään pyörän pyörimistä mittaavan pulssianturin avulla. Paikkaan sidottu kuormittamattoman geometrian signaali on helppo siirtää vakiomatkan verran eteenpäin siten, että eri korkeusviivojen lukuarvot edustavat samaa paikkaa. Tavoitteena oleva radan taipuma saadaan vähennyslaskuna vähentämällä kuormittamattomasta geometriasta kuormitettu geometria.



Kuva 2.1. Periaatekuva jatkuvatoimisesta jäykkyyden mittauslaitteesta.

Laskennallisesti radan taipuma $y(x)$ määritetään seuraavasti (kaava 2.1). Kuormitussa mittauksessa ensimmäisen eli raskaan akselin paikaksi valitaan x , kevyiden akselien paikaksi $x+3$ ja $x+6$. Vastaavasti kuormittamattomassa mittauksessa kolme kevyttä akselia saavat paikat x , $x+3$ ja $x+6$. Kuormitetun ja kuormittamattoman mittauksen akselien paikat ovat samat, vaikka kuormittamaton mittaus tehdään ajallisesti hieman kuormitettua mittausta myöhemmin. Laskennan referenssipisteet ovat paikassa $x+3$ ja $x+6$, joiden suhteen määritetään suoran yhtälöä apuna käyttäen ensimmäisen akselin korkeusasemaero suhteessa toisen ja kolmannen akselin muodostamaan referenssitason nähden. Radan taipuma on kuormitetun ja kuormittamattoman mittauksen korkeusasemaerojen erotus.

$$y(x) = \left[S_L(x+3) + 3 \times \left(-\frac{S_L(x+6) - S_L(x+3)}{6-3} \right) - S_L(x) \right] - \left[S_U(x+3) + 3 \times \left(-\frac{S_U(x+6) - S_U(x+3)}{6-3} \right) - S_U(x) \right] \quad (2.1)$$

missä

$y(x)$	on radan taipuma pisteessä x [mm]
S_L	pyörän korkeusasema kuormitettuna [mm]
S_U	pyörän korkeusasema kuormittamattomana [mm]
x	matka metreinä

Kun oletetaan, että kuormasta aiheutuva radan taipuma on kokonaan palautunut ensimmäisen kevyen pyörän kohdalla, saavat termit S_L ja S_U saman lukuarvon pisteissä $(x+3)$ ja $(x+6)$. Näin kaava 2.1 supistuu muotoon (kaava 2.2)

$$y(x) = S_U(x) - S_L(x) \quad (2.2)$$

Mittauslaitteessa akseliväli on 3 metriä ja varsinainen mittausanturi sijaitsee 1 metrin korkeudella akselista. Anturilukema vastaa pyörän korkeuspoikkeamaa mittakaavassa 1:3 ja kertomalla anturilukemat (mm) kolmella, saadaan selville pyörän todellinen korkeuspoikkeama suhteessa kevyiden akselien muodostamaan referenssitason. Radan taipuma saadaan samaan paikkaan siirrettyjen anturilukemien erotuksena. Välitukoksena saatu korkeuspoikkeama on noin kaksinkertainen radan tarkastusvaunu EMMAn korkeuspoikkeamaan verrattuna, koska virallinen korkeuspoikkeama määritellään keskimmäisen pyörän poikkeamana reunimmaisten pyörien muodostamasta tasosta. Lisäksi Stiffmasterin mittakanta on 5 metrin sijaan 6 metriä.

Mittalaite tarvitsee kalibroinnin, jolla selvitetään antureiden absoluuttinen näyttämä suhteessa toisiinsa ja siten absoluuttinen taipuman suuruus. Kalibrointi voidaan tehdä esimerkiksi mittaamalla radan taipuma kiihtyvyyssantureilla tietyssä kohdassa rataa tai kuvaamalla kameralla raskaan akselin aiheuttama radan taipuma. Myös vaaituksen käyttö on mahdollista. Käytännössä havaittiin, että edellä kuvattujen kalibroitimenetelmien kohdistaminen samaan paikkaan mittausdatassa voi tuottaa ongelmia. Tästä syystä kehitettiin vielä yksi kalibrointitapa, jossa mittalaite irrotetaan kuormittavasta kalustosta, mutta jätetään erillisen tuen varaan siten, että kiinnityspiste tukeutuu kiskoihin raskaan akselin kohdalla. Tämän jälkeen kuorma poistetaan eli kalustoyksikkö ajetaan kauemmaksi. Mittalaite mittaa tällöin suoraan kuorman poistamisen aiheuttaman siirtymän, ja taipuman nollassa voidaan määrittää. Teoriassa kalibrointi tarvitaan vain ensimmäisellä mittauskerralla olettaen että anturien sijainti ei muutu. Prototyypivaiheessa kalibrointi täytyy tehdä jokaisella mittauskerralla, sillä anturit irrotetaan mittauksen välillä, mittalaitteen kiinnityspisteen korkeus-asema ratakuorma-autossa saattaa vaihdella ja myös mittalaitteen kulumisen tai vääntyminen on mahdollista.

2.2.2 Mittausjärjestely ja kalibrointi

Jatkuvatoimisen radan jäykkyyden mittalaitteen toimintaa testattiin kahteen otteeseen Pääradalla liikennepaikkavälillä Lielahden–Ylöjärvi. Rataosuus on 7,4 km pitkä ja se kuuluu kunnossapitotasolle 1A. Rataosuus valittiin testiradaksi edullisen sijaintinsa, sopivan työraon ja vaihtelevien ominaisuuksiensa takia. Rataosalla on sekä korkeita penkereitä että kallioleikkauksia ja jopa vesistöpenkereitä. Tämän tarkemmin radan ominaisuuksiin ei ollut tarkoituskaan perehtyä, sillä tavoitteena oli mittalaitteen toiminnan testaaminen vaihtelevissa olosuhteissa hyvällä radalla. Ensimmäinen mittausajo tehtiin 29.10.2012. Tuolloin maassa oli hieman lunta, mutta kovia pakkasia ei ollut vielä esiintynyt ja ratarakenne oli vielä kokonaan sula. Toinen mittausajo tehtiin 5.3.2013, jolloin ratarakenne oli roudassa. Kuormittavana kalustoyksikkönä käytettiin TKA7:aa, jonka akseliin mittalaite kiinnitettiin varta vasten tehdyllä kiinnityksellä. TKA7:n valikoituminen kuormittavaksi kalustoksi oli tarkkaan harkittua siitä näkökulmasta, että niitä todettiin olevan hyvin saatavilla eri puolilla Suomea (80 kpl). TKA7:n akselipaino on vain 14 tonnia, mutta raskaamman akselipainon saaminen käyttöön eri puolilla Suomea tapahtuviin mittauksiin olisi selvästi työläämpää.

Mittalaite kiinnitettiin TKA7:n jousittamattomaan massaansa Lielahden ratapihalla, missä tehtiin myös mittalaitteen kalibrointi (Kuva 2.2 ja Kuva 2.3). Kalibrointi tehtiin videokameralla, jolla taltioitiin kiskon taipuma raskaan akselin ylityksen aikana. Heti mittalaitteita testattaessa huomattiin, että mittalaitteessa lähempänä vetoyksikköä olevan siirtymäanturin signaalissa oli selvä kohina, jonka aiheuttajaa ei tarkalleen tiedetty eikä sitä pystytty poistamaan. Myöhemmin selvisi, että kohina oli taajuudeltaan noin 12 Hz ja se aiheutui värähtelystä. Värähtelylähde oli oletettavasti TKA:n dieselmoottori, jonka käyntinopeus osui hyvin lähelle mittalaitteen ensimmäisen osan resonanssitaajuutta. Värähtely ei kuitenkaan estänyt varsinaisen mittauksen tekemistä ja liikennepaikkaväli ajettiin läpi pääsääntöisesti ajonopeudella 10 km/h. Puolesta välissä matkaa kokeiltiin myös ajonopeutta 20 km/h, mutta sen havaittiin aiheuttavan yhä enemmän värähtelyä ja ajonopeus alennettiin takaisin 10 km/h. Mittausajon aikana ei pystytty vielä arvioimaan jäykkäysmittauksen toimivuutta, sillä varsinainen laskeutuminen tehtiin vasta jälkikäteen. Kuormitettua ja kuormittamatonta geometriaa mittaavat anturisignaalit havaittiin kuitenkin hyvin samankaltaisiksi, mikä loi uskoa menetelmän toimivuuden puolesta.



Kuva 2.2. Mittalaitteen kiinnitysTKA7:n akseliin jousittamattomaan massaan. Kiinnityksessä käytettiin apuna varta vasten valmistettua sovitetta, joka kiinnitettiin vetovaihteistoon.



Kuva 2.3. Mittalaitteen kalibrointi videokameralla. Laite kalibroitiin kuvaamalla raskaan akselin aiheuttama taipuma tietyssä kohdassa rataa.

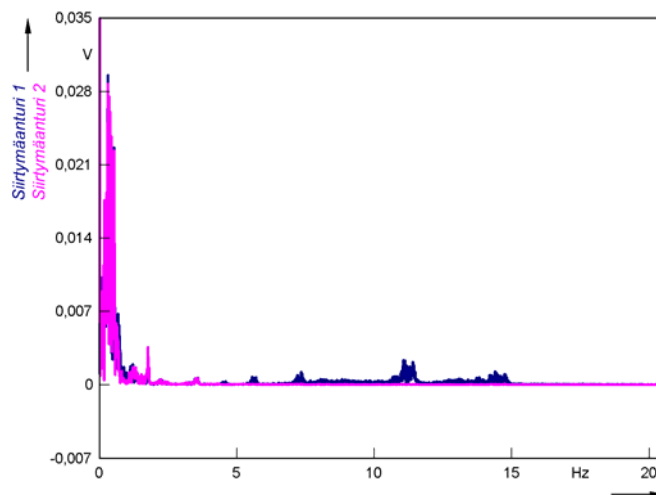
Mittaustulosten paikannukseen käytettiin sekä pulssianturiin perustuvaa matkan mittausta että GPS -vastaanottimeen perustuvaa paikannusta. Näiden lisäksi mittalaitteeseen asennettiin laserit, jotka mittaavat etäisyyttä sivulla sijaitseviin kohteisiin. Näin paikka pystyttiin tarkasti kohdistamaan esimerkiksi sähköratapylväisiin ja kilometripaaluuihin. Lisäksi kallioleikkaukset, sillan kaiteet ja laitekaapit erottuivat helposti lasermittauksen perusteella. Mittausajo myös videoitiin ja yhdessä videon, pulssianturin ja lasermittauksen avulla muodostettiin paikkatieto ajan suhteen. Paikantamisessa onnistuttiin pääraiteella parhaimmillaan jopa paremmin kuin metrin tarkkuudella. Nopeuden nosto 20 km/h aiheutti pulssianturiin perustuvaan matkanmitta-

ukseen virheen, sillä pulssitaajuus oli kyseiselle anturille liian suuri. Tältä osin paikannustarkkuus kärsi selvästi ja paikka-akselia jouduttiin muokkaamaan käsin. Lieulahden ratapiha sijaitsee kaarteessa ja mittaus tehtiin sisäkaarteessa olevalta kolmannelta raiteelta. Ratametrit määräytyvät pääraidetta pitkin ja koska sisäkaarteessa tehty mittaus kulkee lyhyemmän matkan, ratapihan osalta paikannus ei myöskään onnistunut aivan toivotulla tavalla. GPS-paikannusta ei käytetty paikan määrittämiseen, sillä sopivaa työkalua GPS-koordinaattien muuntamiseen ratametreiksi ei ollut saatavilla. Myöhemmin on havaittu raiteentarkastustuloksissa löytyvän nykyään sekä ratametrit että koordinaatit geometriavirheille, joiden avulla GPS-koordinaattejakin pystytään hyödyntämään.

Kalibrointipaikan kohdistaminen mittausdatassa oli myös tarkoitus tehdä lasereiden avulla, mutta ilmeisesti apuna käytetty muovilaatikko oli esteenä liian matala eikä se näkynyt lasereiden mittausdatassa (Kuva 2.3). Tämän lisäksi mittaustuloksia tarkasteltaessa havaittiin, että jäykkyys vaihteli ratapihalla erittäin voimakkaasti. Monen asian yhteisvaikutuksesta jäykkyyden absoluuttinen taso jäi ensimmäisessä mittausajossa hieman epävarmaksi.

Kalibrointiin kehitettiin myöhemmin muitakin vaihtoehtoja, mutta parhaaksi valikoitui kalibrointi kiihtyvyyssantureiden avulla. Tätä varten hankittiin uusia kiihtyvyyssantureita, joiden avulla palautuva painuma voidaan mitata suoraan kiskosta. Näin ollen absoluuttinen taso voidaan lukita kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksen avulla, kunhan kalibrointipaikka tiedetään riittävän tarkasti. Kalibrointipaikka kannattaa valita siten, että se on helposti yksilöitävissä esim. kilometripylvään tai sähköratapylvään kohdalle. Lisäksi epäjatkuvuuskohtia kuten sidekiskoatkoksia kannattaa välttää.

Kuten aiemmin kerrottiin, mittaustuloksissa oli etenkin siirtymäanturin 1 (kuormitettu geometria) osalta kohinaa, joka oli taajuudeltaan noin 12 Hz. Siirtymäanturin 1 tapauksessa oli havaittavissa tapahtumia myös taajuuksien 5,6, 7,4 ja 14 Hz kohdalla (Kuva 2.4). Nämä korkeat taajuudet lienevät kuitenkin merkityksettömiä varsinaisen mittauksen kannalta. On toki mahdollista, että eri siirtymäanturit mittaavat aidosti erilaisia taajuuksia, sillä toinen mittaa kuormitettua geometriaa ja toinen kuormittamatonta. Edellä luetellut taajuudet tarkoittavat aallonpituuksina 0,5, 0,38 ja 0,2 metriä eikä niiden oletettu aiheutuvan jäykkyysmuutoksista. Ensimmäinen merkittävä antureiden yhteinen taajuus on 3,6 Hz ja toinen 1,8 Hz. Nämä vastaavat ajonopeudella 10 km/h aallonpituutta 3,1 ja 1,55 metriä. Nämäkin aallonpituudet voidaan olettaa aiheutuvan ainakin osittain itse mittauksesta, sillä aallonpituudet vastaavat pyörien kehien pituutta tai niiden kerrannaisia. Myös mittalaitteen akseliväli on 3 metriä, mutta sen ei oleteta vaikuttavan syntyviin taajuuksiin. Varsinaisten mittaustapahtumien voidaan olettaa alkavan merkittävässä määrin vasta näiden taajuuksien alapuolelta. Korkein mittauksen kannalta mielenkiintoinen taajuus on pölkkävälisestä aiheutuva 4,55 Hz, joka näkyy hieman kuormitetussa geometriassa (siirtymäanturi 1), mutta ei kuormittamattomassa (siirtymäanturi 2).



Kuva 2.4. Esimerkki mittalaitteen siirtymäanturien taajuussisällöstä Lielähti-Ylöjärvi-rataosalta.

2.3 Mittausmenetelmän rajoitukset

2.3.1 Mittausmenetelmän virhelähteet

Mittauksen absoluuttinen mittaustarkkuus on monen tekijän summa. Eniten absoluuttiseen palautuvan painuman lukuarvoon vaikuttaa laitteen kalibrointi. Siinä tehtävä virhe näkyy suoraan mittaustulosten tasossa, ja eri kohteiden keskinäinen vertailu vaikeutuu. Huolellisella kalibroinnilla on mahdollista saavuttaa noin 0,1 mm mittaustarkkuus. Kalibrointi ei kuitenkaan vaikuta mittalaitteen suhteelliseen mittaustarkkuuteen eli jäykkyysvaihtelujen havainnointiin. Suhteelliseen tarkkuuteen vaikuttavat eniten mittalaitteen kulkuominaisuudet eli miten tarkkaan laite seuraa vetokalustoa samaa ajolinjaa pitkin. Ensimmäisessä prototyypissä pyöräprofiilit olivat erilaiset mittalaitteen ja vetokaluston kesken ja tämä aiheutti virhettä etenkin vaihteiden jyrkissä kaarteissa. Vetokalustossa käytettävä S1002-profiili ei ole symmetrinen vaan ulkokaarten puolella olevan pyörän vierintäsäde kasvaa enemmän kuin sisäkaarten puoleisen pienenee, kun akseli siirtyy sivusuunnassa ulkokaarten suuntaan. Tämä aiheuttaa sen, että vetokaluston akselilla sijaitseva mittalaitteen kiinnityskohta nousee kiskon suhteen alkuperäistä korkeammalle jyrkässä kaarteissa. Mittalaitteen suorat kartiopyörät käyttäytyvät siten, että mittalaitteen akseleiden keskikohdat pysyvät kiskon suhteen samalla korkeudella sivusiirrosta huolimatta. Pyörien erilaisuuden takia vaihteessa käyrälle ajo tuotti todellista pienemmän taipuman.

Toiseen prototyyppiin mittalaitteen pyörät sorvattiin S1002-profiiliin. Samalla mittalaitteessa siirryttiin erillisaakeroinnista kiinteisiin akseleihin kulkuominaisuuksien parantamiseksi. Ajatuksena oli, että laitteella olisi turvallisempaa liikkua vaihteissa myös työntäen ja samalla edellä kuvatun korkeuspoikkeamaongelman ajateltiin poistuvan. Kulkuominaisuudet paranivatkin olennaisesti ja liikkuminen radalla muuttui huomattavasti helpommaksi. Vaihdekujia on sittemmin ajettu molempiin suuntiin jopa 30 km/h ilman raiteilta suistumista. Toinen pyörien laakeroinnin muuttamisen peruste oli korkeuspoikkeaman saaminen vertailukelpoiseksi vetokaluston kanssa. Tässä ei kuitenkaan onnistuttu täysin. Vaikka pyörissä on sama profiili, erilainen halkaisija aiheuttaa sen, että akselien vaatima sivusiirtymä on kaarteissa erilainen. Koska pyöräprofiili ei ole sivusiirron suhteen symmetrinen, nousee suuremmat pyörät

omaavan TKA:n akselin keskikohta (ja siten mittalaitteen kiinnityskohta) kaarteissa korkeammalle kuin mittalaitteen pienemmillä pyörillä varustettu akseli. Ero ei ole uusilla profiileilla kovin suuri, mutta pienissä kaarresäteissä kuten lyhyissä vaihteissa (kaarresäteellä $R=300$ m) kuitenkin merkittävä. Vetokaluston pyörät ja kiskoprofiili eivät ole välttämättä enää täsmälleen alkuperäisen profiilin mukaiset, joten tarkkaa virhettä ei pysty ilman pyöräprofiilin mittaamista määrittämään. Taulukossa (Taulukko 2.1) on esitetty teoreettinen kulkuominaisuuksista aiheutuva virhe eri kaarresäteisissä kaarteissa uusilla profiileilla tarkasteltuna.

Taulukko 2.1. Erikokoisten pyörien ($d = 500$ ja $d = 1000$) kulkuominaisuuksista aiheutuva teoreettinen virhe mittauksessa. Virhe kasvaa maksimiin mittalaitteen matkalla sen liikkuessa kaarteeseen. Virhe on myös hetkellisesti erimerkkinen mittalaitteen poistuessa kaarteesta suoralle.

Kaarresäde (m)	Kulkuominaisuuksista aiheutuva teoreettinen palautuvan painuman mittausrvirhe (mm)
300	0,59
900	0,20
1250	0,14

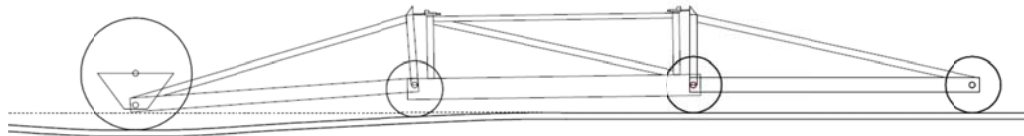
Kulkuominaisuuksista aiheutuva virhe on melko pieni ja vastaava virhe voi syntyä myös mittalaitteen epäkeskisyyksistä. Esimerkiksi korkeuspoikkeamaa mittaavan siirtymäanturin tulee olla täysin samalla lävistäjällä vaunun kiinnityspisteen kanssa, jotta eri suuntiin kääntyvät kaarteet näkyvät samalla tavalla. Siirtymäanturin vastinkappaleen avulla on myös mahdollista kompensoida pyörien kulkuominaisuuksien virheitä kaarteissa, mutta se vaatii huolellista kalibrointia.

Mittausantureiden suhteellinen tarkkuus on anturikohina huomioituna noin 0,005 mm. Laitegeometriasta aiheutuva kerroin 3 heikentää suhteellisen tarkkuuden noin 0,015 mm:iin, jota voidaan selvästi parantaa käyttämällä alipäästösuodatinta tai liukuvaa keskiarvoa. Tämän lisäksi etenkin kalustoyksikköön kiinnitetyssä mittavaunussa havaittiin aluksi värähtelyä, joka oli suuruudeltaan enimmillään jopa yli 1 millimetri. Värähtely pystytään poistamaan niin ikään käyttämällä alipäästösuodatusta, mutta toimenpide rajoittaa ajonopeuden kasvattamista. Ainakin näin alkuvaiheessa 10 km/h tapahtuva mittaaminen on kuitenkin useimmiten riittävän tehokasta.

Luonnollisesti kiskoja täytyy olla puhtaat, jotta mittaus toimii luotettavasti. Lumi häiritsee mitattua selvästi sivuraiteilla, joilla kiskot ovat sateen jäljiltä lumen peitossa. Mittalaite suistuu pahimmillaan kiskoilta lumen takia, mutta lievemmissäkin tapauksissa mittauksen tulos vääristyy merkittävästi. Lumen vaikutus voi olla palautuvaa painumaa kasvattava tai pienentävä riippuen siitä mikä akseli mittavaunusta kulkee korkeammalla lumen päällä.

Pyörien epäpyöreys näkyy mittauksissa noin 1,6 metrin aallonpituutena. Ensimmäisessä prototyypissä oli erillislaakeroinnin takia mahdollista että pyörien epäpyöreiden vaihe muuttui mittauksen aikana. Toisinaan akselin eri pyörien epäpyöreys oli samassa vaiheessa, jolloin virhettä ei esiintynyt. Toisinaan epäpyöreys on eri vaiheessa, jolloin virhe on enimmillään 0,5 mm. Tämä vaikeutti tulosten tulkintaa etenkin pienipiirteisten jäykkyysvaihtelujen tarkastelussa, vaikka laaja-alaisessa jäykkyyden tarkastelussa sillä ei ole merkitystä, sillä virhe on jaksollista ja keskimäärin nolla. Tämä ominaisuus kuitenkin poistui toisessa prototyypissä.

Eniten mittaustuloksissa ihmetystä herättänyt piirre oli Lielahden liikennepaikalla joissakin yksittäisissä pisteissä esiintynyt negatiivinen taipuma. Fyysisesti tämä tarkoittaisi sitä, että kisko nousisi ylöspäin raskaan kuormituksen vaikutuksesta. Näin ei voi todellisuudessa tietenkään olla ja selitystä ilmiöön lähdettiin etsimään itse mittausmenetelmästä. Ilmiö liittyi sidekiskojohtokosten kohtiin ja oletettavasti siihen, että raskaan kuorman aiheuttama taipuma ulottuu laajemmalle kuin oletuksena oleva maksimissaan 3 metriä akselista (Kuva 2.5). Oletetaan, että rata on pystygeometrialtaan suora. Laajasta taipumasuppilosta aiheutuen kuormitettu geometria havaitsee todellista pienemmän taipuman ja kuormittamaton geometria havaitsee myös kuormasta aiheutuvan pienen taipuman ensimmäisen kuormittamattoman pyörän kohdalla. Jos jälkimmäinen on edellistä suurempi, tulee taipumasta negatiivinen.



Kuva 2.5. Laajan taipumasuppilon vaikutus mittaukseen.

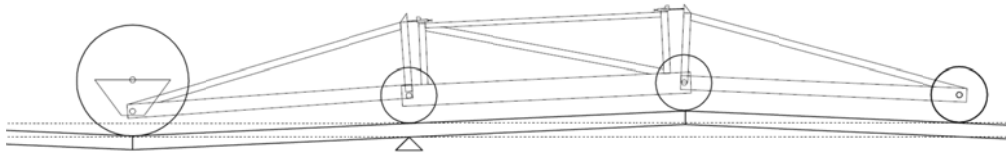
Laskennallisesti asiaa voi tarkastella seuraavasti: Oletetaan, että taipuma ehtii palautua kolmen metrin matkalla. Sijoitetaan kaavaan 2.1 kuvitteelliset lukuarvot vaikkapa siten, että raskaan pyörän korkeusasema $S_L(x) = 1 \text{ mm}$ (0,001 m) ja muut pyörät sijaitsevat korkeudella 6 mm. Silloin taipumaksi saadaan 5 mm (kaava 2.3).

$$y(x) = \left[0,006 + 3 \times \left(-\frac{0,006 - 0,001}{6 - 3} \right) - 0,001 \right] - \left[0,006 + 3 \times \left(-\frac{0,006 - 0,006}{6 - 3} \right) - 0,006 \right] = 0,005 \quad (2.3)$$

Jos kuitenkin käy niin, että taipumasuppilo on oletusta laajempi ja taipuma vaikuttaa vielä pyörän $S_L(x+3)$ kohdassa 2 mm verran, saa se lukuarvon $S_L(x+3) = S_U(x) = 4 \text{ mm}$. Laaja taipumasuppilo vaikuttaa siis myös pyörään $S_U(x)$, joka kulkee niin ikään 2 mm alempana. Muut pyörät kulkevat edelleen tasolla 6 mm. Tällöin kaava 2.1 antaa tulokseksi -1 mm (kaava 2.4).

$$y(x) = \left[0,004 + 3 \times \left(-\frac{0,006 - 0,004}{6 - 3} \right) - 0,001 \right] - \left[0,006 + 3 \times \left(-\frac{0,006 - 0,006}{6 - 3} \right) - 0,004 \right] = -0,001 \quad (2.4)$$

Toinen oletama negatiivisen taipuman synnystä on tilanne, jossa sidekiskojohtoksia on tiheästi, jatkosten kohdalla sepeli on jauhaantunutta ja näiden välissä on lyhyt selvästi jäykempi osuus. Tällöin jäykempi osuus voisi toimia tukipisteenä ja kisko vipuvartena siten, että raska kuorma nostaa viereistä sidekiskojohtokosta ilmaan. Tämä aiheuttaisi sen, että tukipisteen kohtaan muodostuisi negatiivinen taipuma, sillä kuormitettu geometria ei tuota kohtaan juurikaan taipumaa, mutta kuormittamaton geometria havaitsee siinä suuremman taipuman (Kuva 2.6).



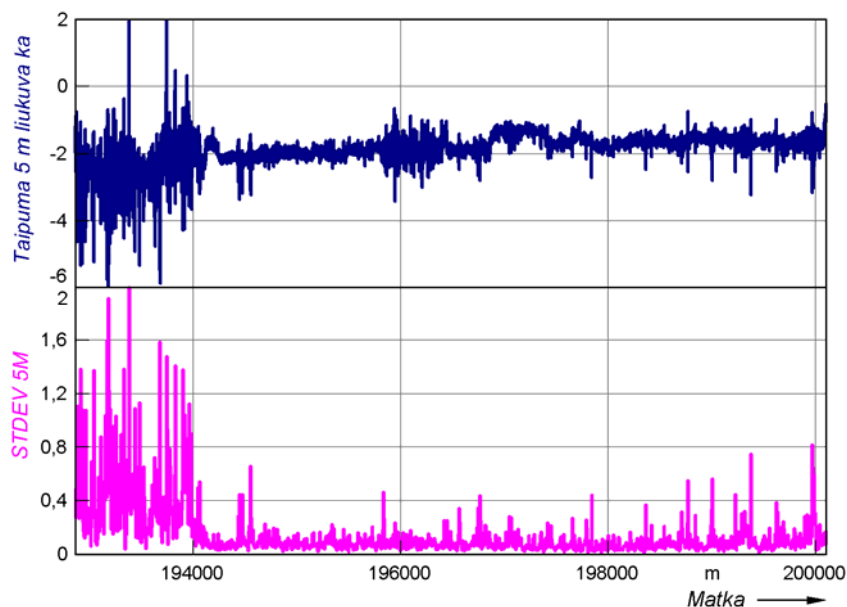
Kuva 2.6. Sidekiskojohtokosten ja jauhaantuneen tukikerroksen vaikutus mittaukseen.

Lukuarvoina kuormitetun geometrian pyörien korkeusasemat (mm) olisivat vaikkapa 2, 3 ja 3 ja kuormittamattoman geometrian pyörien 3, 4, 3. Tällöin kaava 2.1 antaa taipumaksi -1 mm (kaava 2.5).

$$y(x) = \left[0,003 + 3 \times \left(-\frac{0,003 - 0,003}{6 - 3} \right) - 0,002 \right] - \left[0,004 + 3 \times \left(-\frac{0,003 - 0,004}{6 - 3} \right) - 0,003 \right] = -0,001 \quad (2.5)$$

Edellä kuvatun perusteella on myös laskennallisesti mahdollista, että mitattu taipuma saa väärän etumerkin. Ominaisuuden poistaminen nykyisestä mittalaitteesta on lähes mahdotonta. Ainoa hieman helpotusta tuova ratkaisu olisi akselivälin pidentäminen, josta seuraisi nykyisellä kevyellä rakenteella lisää värähtelyjä, jotka edelleen hankaloittaisivat mittaamista. Jos mittalaitteesta tehdään tulevaisuudessa tuotantokäyttöön tarkoitettu versio, on silloin syytä huomioida tämäkin asia.

Asian voi ajatella myös siten, että niissä kohdissa rataa, joissa esiintyy mittauksen mukaan negatiivista taipumaa, on olemassa jokin perustavaa laatua oleva jäykkyysongelma. Yleisesti ajatellen jäykkyyden absoluuttinen taso ei useinkaan ole varsinainen ongelma vaan ongelmat muodostuvat kohtiin, joissa jäykkyys vaihtelee voimakkaasti. Tästä syystä absoluuttisen taipuman lukuarvon tarkastelun sijaan voisi olla perusteltua tarkastella esimerkiksi taipuman keskihajontaa. Keskihajonnassa taipuman muutoksen suunta ei ole määräävä vaan kaikki poikkeamat keskiarvosta kasvattavat keskihajontaa. Kuvassa (Kuva 2.7) esitetystä vertailusta havaitaan, että kaikki suuren taipuman tuottavat kohdat kasvattavat keskihajontaa ja sidekiskoraide km 193 erottuu selvästi suuren jäykkyysvaihtelun takia.

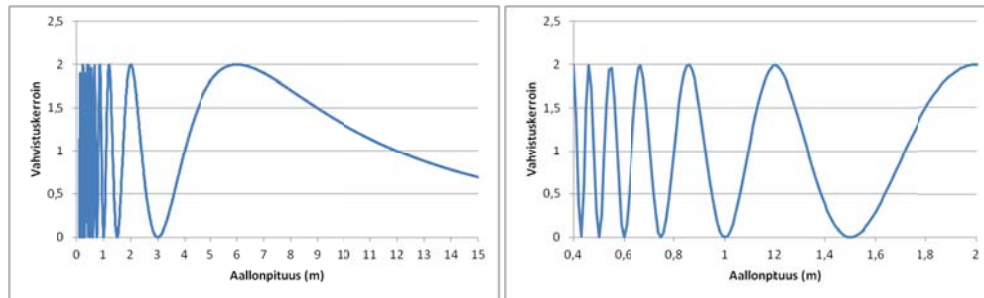


Kuva 2.7. Viiden metrin pituinen taipuman liukuva keskiarvo ja keskihajonta.

2.3.2 Mittausten yhteys korkeuspoikkeamien määrittämiseen

Käytössä oleva mittausmenetelmä tunnetaan paremmin mittakantamittauksena, jota käytetään yhtenä mittausmenetelmänä radantarkastuksessa muun muassa korkeuspoikkeamien määrittämiseen. Jäykkyyssovelluksessa mittakantamittaus tehdään kahden kertaan ja näitä tuloksia on mahdollista käyttää myös radan korkeuspoikkeamien määrittämiseen. Mittaustavalla on korkeuspoikkeamien määrittämisessä kuitenkin rajoituksia, jotka on syytä ottaa huomioon. Menetelmällä on ominaisuus korostaa tiettyjä aallonpituuksia ja akselivälin ollessa symmetrinen, menetelmä myös kadottaa tietyt aallonpituudet. Oletetaan, että radan korkeuspoikkeama vaihtelee aallonpituudella 6 metriä ja korkeusvaihtelun muoto noudattaa siniaallon muotoa. Kun lasketaan mittakannan keskellä olevan pyörän korkeuspoikkeama kahden muun pyörän suhteen, saadaan tulokseksi kaksinkertainen lukema todelliseen keskimääräiseen korkeuspoikkeamaan nähden. Tämä aiheutuu siitä, että keskimäinen pyörä on täsmälleen 180 astetta eri vaiheessa siniaaltoja kuin kaksi muuta pyörää. Tällöin korkeuspoikkeama tulee lasketuksi huippujen suhteen, vaikka tavoitteena on saada poikkeama keskimääräisestä radan korkeusasemasta. Aallonpituus 6 metriä tuottaa mittakantamittauksessa siis vahvistuskertoimen kaksi. Vastaava vahvistuskerroin saadaan kaikilla aallonpituuksilla, jotka ovat mittakanta 6 m jaettuna pariton kokonaisluku. Tällaisia ovat esim. aallonpituudet 2 m ($6/3$ m), 1,2 m ($6/5$ m), 0,857 m, 0,667 m, 0,545 m, jne.

Jos taas radan todellinen korkeuspoikkeama noudattaa siniaaltoja, jonka aallonpituus on 3 metriä, mittakantamittaus ei havaitse muutosta lainkaan, sillä kaikki pyörät ovat koko ajan samassa vaiheessa siniaaltoja. Tällaisia ns. "sokeita" aallonpituuksia ovat kaikki mittakannan tai akselivälin suhteen parillisella kokonaisluvulla jaolliset aallonpituudet kuten 3 m, 1,5 m, 1 m, 0,75 m, 0,6 m, 0,5 m, jne. (Kuva 2.8). Käyttämällä epäsymmetristä akseliväliä voidaan välttää monilta sokeilta kohdilta, mutta eri aallonpituuksien tulostumisesta erilaisilla painokertoimilla ei päästä kokonaan eroon. Tästä syystä mittakantamittauksessa käytetään erityisiä muuntofunktioita, joilla eri aallonpituuksia painotetaan siten, että tulos vastaa paremmin haluttua lopputulosta.



Kuva 2.8. Mittakantamittauksen vahvistuskerron mittalaitteen mukaisella 3+3 metrin symmetrisellä pyörävälillä korkeuspoikkeaman aallonpituuden suhteen.

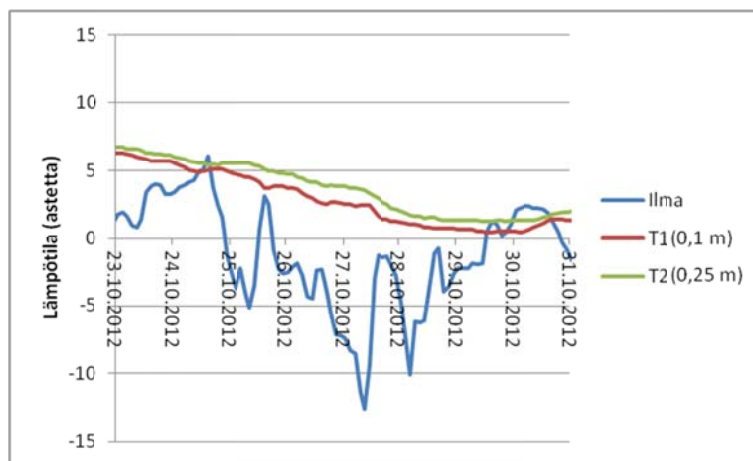
Symmetrisessä mittakannassa syntyvät sokeat pisteet ovat erittäin haitallisia, jos tavoitteena on mitata ainoastaan radan pystygeometrian muotoa. Jäykkyyden mittauksessa mittaus tehdään sekä kuormittamattomasta että kuormitetusta radasta ja molempiin mittauksiin painotukset tulostuvat samalla tavalla. Kun nämä kaksi geometriaa vähennetään toisistaan, jäljelle jää vain kuormasta aiheutuva taipuma, jonka arvo on edellä kuvatuista virheistä riippumaton. Välituloksena saatavan pystygeometrian tulkinnassa on kuitenkin syytä muistaa edellä kuvatut ominaisuudet.

3 Mittaustulokset Lielähti–Ylöjärvi

3.1 Syksymittaus

3.1.1 Mittausolosuhteet

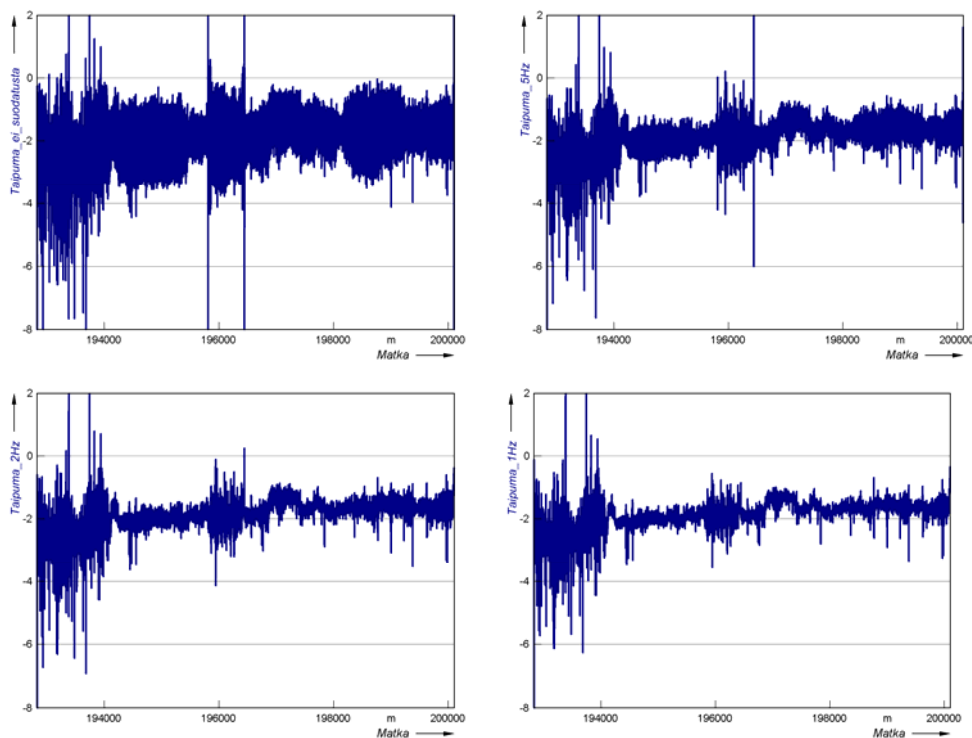
Ensimmäinen varsinainen mittausajo tehtiin Lielähti–Ylöjärvi-rataosalla 29.10.2012. Mittauspäivää edelsi parin päivän pakkasjakso ja ennen mittausa oli satanut hieman lunta. Lämpötila oli mittauksen aikana lähellä nollaa tai hieman nollan yläpuolella. Ratarakenne oli mittaushetkellä sula, josta osoituksena Viialasta, noin 40 km etelään sijaitsevalta, routaseuranta-asemalta kyseiseltä ajankohdalta tulostettu mittausdata (Kuva 3.1). Kuvasta nähdään, että ilman lämpötila oli ollut ennen mittausa miinuksella, mutta tukikerros (anturit T1 ja T2) ei ollut vielä jäässä.



Kuva 3.1. Viialan routaseuranta-aseman mittausdataa mittausajankohdalta.

3.1.2 Mittaustulokset

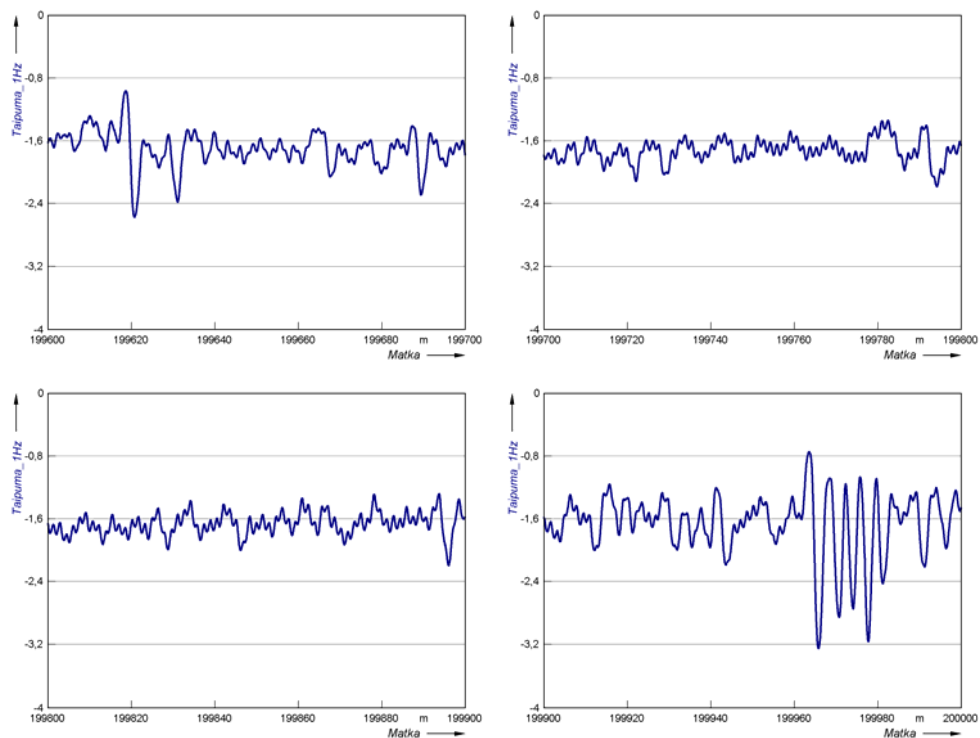
Koko liikennepaikkavälin käsittävät mittaustulokset on esitetty kuvassa (Kuva 3.2). Ensimmäisessä kuvassa on suodattamaton data ja muissa 5 Hz, 2 Hz ja 1 Hz alipäästösuodattimella suodatettu data. Varsinkin suodattamattomassa datassa näkyvät piikit km 196 molemmilla puolin ovat ne kohdat, joissa nopeus nostettiin ja laskettiin 10–20 km/h välillä. Piikki liittyy TKA:n vaihdevälityksen muuttamiseen ja ilmeisesti vetovaihteiston nykäisyyn tai värähtelyyn, mutta se on varsinaisen mittauksen näkökulmasta mittausvirhe. Kyseisellä välillä myös matkan mittauksessa käytettävän pulssianturin mittaustaajuus ylitettiin ja tästä aiheutuen myöskään jäykkyyslaskenta ei toiminut kunnolla. Tämän lisäksi etenkin kilometrillä 193 esiintyy voimakasta vaihtelua, joka liittyy suurelta osin ratapihalla olevaan sidekiskoraiteeseen. Muut vaihtelut ja yksittäiset piikit vaativatkin jo tarkempaa tarkastelua. Kuvasta (Kuva 3.2) voidaan havaita, että alhaisella 10 km/h ajonopeudella on mahdollista käyttää 1 Hz alipäästösuodatinta mittaustuloksen suuresti kärsimättä.



Kuva 3.2. Radan taipuman mittaustulokset liikennepaikkaväliltä Lielähti–Ylöjärvi.

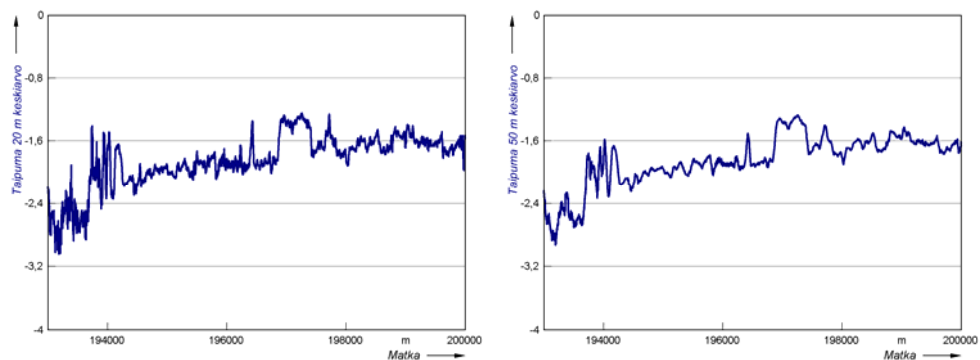
Lähempi tarkastelu osoittaa, että mittaustuloksissa on useita erityyppisiä tapahtumia. Kuvassa (Kuva 3.3) on esitetty mittaustulokset ratametreiltä km 199+600–200+000. Esimerkiksi km 199+620 kohdalla on selvä heikomman jäykkyyden kohta, joka on hyvin paikallinen. Vastaava muutaman pölkyn alueelle sijoittuva heikko kohta on myös km 199+630, km 199+690 ja km 199+895. Sen sijaan välillä km 199+960–199+990 osuu useita heikkoja kohtia. Jälkikäteen tehdyssä maastokatselmuksessa havaittiin kyseisissä paikoissa selvästi kohtia, joissa pölkyn liikkeitä olivat keskimääräistä suurempia. Näissä kohdissa ratapölkyt olivat huonosti tuettuja ja tästä syystä osa pölkystä roikkui hieman ilmassa. Vastaavia havaintoja roikkuvista pölkystä tehtiin myös muualla kuvan (Kuva 3.2) osoittamissa suurten taipumien kohdissa. Syitä pölkkyjen roikkumiseen oli useita erilaisia ja niistä silmämääräisesti tarkastelemalla pystyttiin yksilöimään ainakin kiskoatkoksiin, sillan päätyihin, rumpuihin ja kallioleikkausten alkamiseen liittyviä ongelmia.

Kuvasta (Kuva 3.3) näkyy myös muita vaihteluja, joista pienin vaihtelu on aallonpituudeltaan 1,5 metriä (amplitudi noin 0,15 mm) ja se liittyy todennäköisesti mittalaitteen pyörien vähäiseen epäpyöreyyteen. Tämä lisäksi on selvästi havaittavissa 5 tai 10 metrin välein tapahtuvia muutoksia taipumassa, minkä aiheuttajaa ei ole pystytty vielä yksilöimään. Vaihtelu voi olla aivan luonnollista jäykkyyden vaihtelua tai yhtä lailla mittalaitteesta aiheutuvaa virhettä. Useammat mittaustoistot saattaisivat avata problematiikkaa, sillä vaihtelujen toistuessa samalla tavalla mittauskerrasta toiseen osoitaisi se vaihtelun olevan todellista.



Kuva 3.3. Radan taipuman mittaustulokset liikennepaikkaväliltä Lielahdi–Ylöjärvi tarkasteltuna 100 metrin ikkunoissa.

Tarkasteltaessa jäykkyyden muuttumista pidemmän matkan aikana, voidaan mittausdatasta laskea liukuva keskiarvo vaikkapa 20 tai 50 metrin matkalta. Kuvassa (Kuva 3.4) on esitetty kyseiset keskiarvot ja niistä voidaan todeta, että taipuma keskimäärin pienenee kilometrien kasvaessa. Kaikista suurimmat taipumat mitattiin Lielahden ratapihalla km 193 ja pienimmät taipumat kallioleikkauksessa km 197. Tässä kohtaa on hyvä muistuttaa, että taipuman absoluuttinen taso sisältää huomattavan epävarmuuden kalibroinnissa tapahtuneiden virheiden takia. Suhteelliset muutokset ovat sen sijaan mittaustarkkuuden puitteissa oikein.



Kuva 3.4. Radan taipuman mittaustulokset liikennepaikkaväliltä Lielahdi–Ylöjärvi tarkasteltuna 20 m ja 50 m liukuvan keskiarvon avulla.

3.2 Talvimittaus

3.2.1 Mittausolosuhteet

Mittausajo routaantuneesta ratarakenteesta tehtiin Lielähti-Ylöjärvi liikennepaikkavälillä 5.3.2013. Mittausajankohtaa edelsi kuun vaihteessa ollut suojajakso, jolloin lämpötila nousi selvästi suojan puolelle. Lämmin jakso sulatti ainakin lunta radan pinnalta, mutta ehkä myös hieman tukikerroksen yläosaa. Sää muuttui selvästi ennen mittauksia ja parina kolmena mittauksia edeltävänä päivänä oli keskimäärin yli 10 astetta pakkasta. Roudan syvyys oli Viialan routaseuranta-aseman havaintojen mukaan 0,8 metriä. Viialan routaseuranta-asemalla rata on routalevytetty, mikä pienentää roudan tunkeutumissyvyyttä. Niin ikään Lh-Ylö-rataosalla on useita routalevytettyjä osuuksia, joiden roudan syvyyden voidaan olettaa olleen hyvin samankaltainen. Muilta osin roudan syvyys oli oletettavasti jonkin verran suurempi.

Aikaisemmassa mittauksessa osittain epäonnistuneeseen kalibrointiin kiinnitettiin erityistä huomiota. Kalibroinnissa käytettiin edelleen yhtenä menetelmänä videokameraa, jolla kuvattiin raskaan akselin aiheuttaman kiskon taipuma kahdesta paikasta pääraiteelta, jotta välttyttäisiin sidekiskoraiteen mahdollisesti aiheuttamilta ongelmilta. Myös mittauskohdiksi valittiin helposti lasereilla tunnistettavissa olevia kohtia radalta ja paikka vielä varmennettiin asettamalla erityinen merkkipaalu kyseiseen kohtaan. Yhdestä kohdasta rataa mitattiin radan taipuma myös kiihtyvyysantureilla ja välilevyn kokoonpuristuma mitattiin suoraan siirtymäantureilla. TKA7 ja mittavaunun ylityksen lisäksi mitattiin myös IC-junan ylitys.

Kamerakuvaus osoitti kiskon palautuvan painuman olevan km 200+102 tehdyssä kuvauksessa noin 0,5–0,7 mm. Toisella kamerapaikalla km 194+566 videosta tulkittu palautuva painuma oli noin 0,9–1,1 mm. Kiihtyvyysantureilla ja siirtymäantureilla IC-junan matkustajavaunusta mitattu palautuva painuma oli 0,8 mm ratametrillä 198+702. Suoraan kiskosta mitattuna kiihtyvyyden tulkinta siirtymäksi ei onnistu kyseisen anturityypin saturoituessa korkeista taajuuksista. Kiihtyvyysanturimittaus ei onnistunut TKA7:n osalta edes pölkystä, sillä pieni ajonopeus tuottaa pienet kiihtyvyydet suhteessa tarvittavaan integrointi-aikaan ja mittaustulos on siksi epäluotettava.

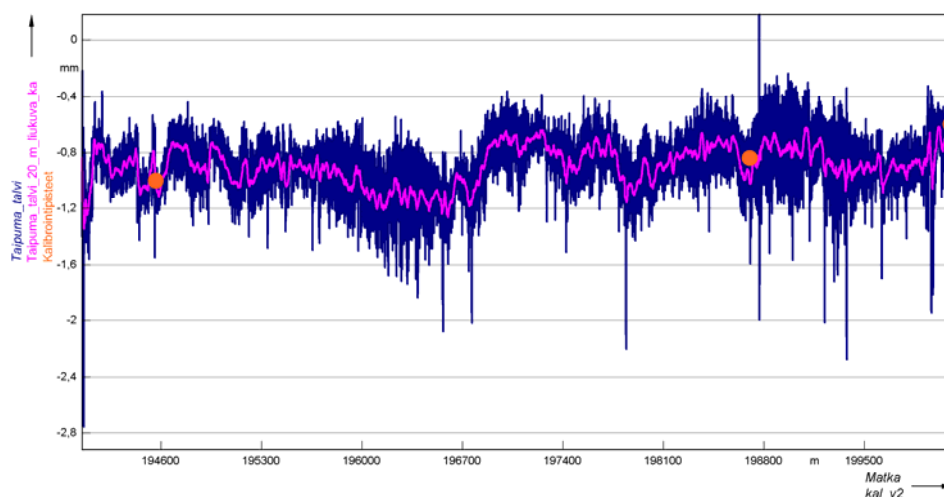
Kolmesta pisteestä referenssimenetelmällä tehdyt havainnot palautuvasta painumasta korreloivat kohtalaisen hyvin mittalaitteen mittauksen kanssa. Havaintojen perusteella palautuvan painuman absoluuttinen taso voidaan kiinnittää melko luotettavasti. Kalibrointitapaan jäi edelleen kehitettävää, sillä kalibrointi oli monimutkainen ja siihen sisältyi monta virhemahdollisuutta. Kamerakuvaus on yksinkertainen tapa, mutta tulkinta on yllättävän hankalaa, sillä videon mukaan kisko liikkuu ylös ja alas myös silloin, kun kuorma ei ole edes kovin lähellä kuvauspistettä. Toisenlaisilla kiihtyvyysantureilla kiihtyvyyksimittaus suoraan kiskosta luultavasti onnistuisi suurilla ajonopeuksilla, mitta hitaalla ajonopeudella tuskin sekään toimii toivotulla tavalla.

Kalibrointiin haettiin vielä muita ratkaisuja, joista parhaimmaksi ideaksi ajateltiin kuorman poistaminen yhtälöstä. Kalibrointi voidaan tehdä siten, että ensimmäinen mittausvaunu tuetaan kiskoihin erillisellä tuella raskaan akselin alapuolelta. Tämän jälkeen irrotetaan kiinnitystappi TKA:sta ja ajetaan TKA kauemmaksi. Kun mittalaitte mittaa koko ajan, se havaitsee kuorman poistumisesta aiheutuvan taipuman muutoksen. Tapin irrottamisesta voi aiheutua pieni liike, mutta kuorman vaikutus tuleekin

laskea erotuksena tapin irrottamisen ja kuorman poistamisen väliseltä ajalta. Näin tiedetään varmasti kuorman aiheuttama taipuma kyseisessä kohdassa rataa. Tälle pisteelle voidaan antaa kalibroinnissa saatu taipuman arvo ja pisteen paikka tiedetään tarkasti, sillä mittaus alkaa kyseisestä pisteestä. Tätä kalibroititapaa käytettiin myöhemmissä yhteyksissä tehdyissä vaihemittauksissa ja se osoittautui varsin toimivaksi tavaksi.

3.2.2 Mittaustulokset

Mittaustulokset talvimittauksista koko rataosalta on esitetty kuvassa (Kuva 3.5). Sininen käyrä on taipumasignaali 2 Hz alipäästösuodattimella suodatettuna, mikä 10 km/h mittausnopeudella tarkoittaa aallonpituutta noin 1,4 metriä. Tätä lyhyemmät vaihtelut eivät siis näy signaalissa kokonaan ja hyvin lyhyet vaihtelut kuten kiskoja-kokset eivät lainkaan. Pinkki käyrä on edellä kuvatusta signaalista laskettu 20 metrin liukuva keskiarvo, joka kuvaa paremmin alueellisia jäykkyysvaihteluja. Kalibrointipisteet on merkitty kuvaan oransseilla täplillä. Mittaustuloksissa näkyy yksittäisiä suuria taipumia useissa eri kohdissa rataa. Näiden tarkastelemista varten kuvan mittakaavaa täytyy suurentaa selvästi. Keskiarvokäyrässä selvimmin erottuvat km 194+060 sijaitseva vaihde ja siitä eteenpäin jostakin muusta syystä aiheutuva heikomman jäykkyyden alue (mahdollisesti routalevy). Km 194+545 sijaitsee silta, joka erottuu kuvaajasta molemmin puolin siltaa sijaitsevien rataa pehmentävien routalevytysten takia. Km 196+900 alkaa kallioleikkaus, joka erottuu taipumaa pienentävänä myös talvella. Kallioleikkaus loppuu kokonaan km 197+850, missä lyhyemmän keskiarvon signaalissa näkyy selvästi heikko tuenta suurena pistemäisenä taipumana. Useimpiin yksittäisiin taipumapiikkeihin löytyy selitys jo videotulkinnan perusteella, sillä niihin liittyy jokin radan epäjatkuvuuskohta, kuten esimerkiksi baliisi, kuumakäynti-ilmaisoin tai eristysjatkos. Osa aiheutuu myös muista syvemmällä ratarakenteessa olevista asioista, kuten silloista, routalevyistä, rummuista tai kallioleikkauksista.



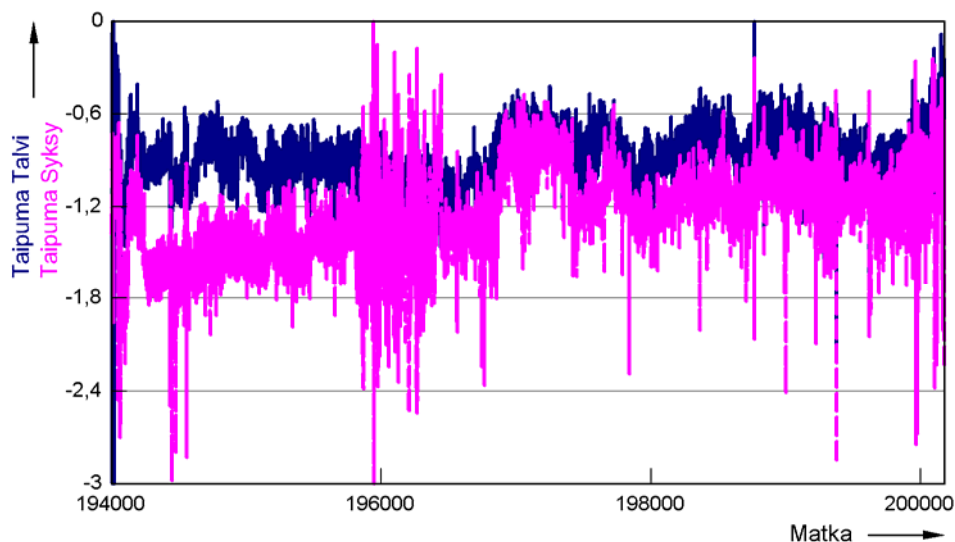
Kuva 3.5. Lielähti-Ylöjärvi-rataosan talvimittausten tulokset.

Talvimittauksen aikaan ratapihojen sivuraiteilla kiskot olivat lumen peitossa. TKA puhdisti kiskot osittain oman massansa avulla, mutta kevyen mittalaitteen pyörät nousivat hetkittäin lumen päälle. Tästä syystä lumisissa kohdissa taipumamittaus tuotti hetkittäin virheellisiä tuloksia ja ratapihaosuudet jätettiin siksi pois kuvasta (Kuva 3.5).

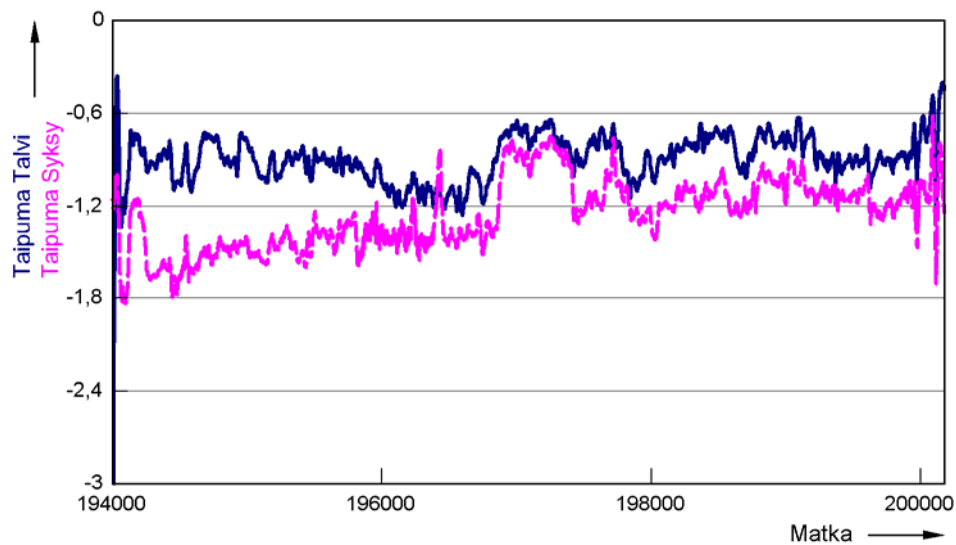
3.3 Mittauskertojen välinen vertailu

3.3.1 Koko rataosan tarkastelu

Syksyn ja talven mittaustulosten vertailua varten mittausdatasta piirrettiin 1 metrin ja 20 metrin liukuvat keskiarvot (Kuva 3.6 ja Kuva 3.7). Koko liikennepaikkavälin käsittävässä kuvassa yksityiskohdat häviävät kohinaan, mutta joitakin havaintoja siitäkin voidaan tehdä. Kohinataso eri mittauksissa on suuruusluokaltaan yhtenevä. Matkan määrittäminen onnistuu riittävän tarkasti, jotta eri kerroilla tehtyjä mittauksia voidaan verrata keskenään. Syksymittauksissa kalibroinnissa oli ongelmia ja mittaustulosten absoluuttinen taso jäi epävarmaksi. Talvimittauksissa kalibrointi onnistui syksyllä saavutettujen kokemusten ansiosta luotettavammin. Fysikaalisesti ajatellen paltautuvan painuman pitäisi olla talvella keskimäärin pienempi radan routaantumisen takia. On kuitenkin olemassa kohtia, kuten kallioleikkauksia ja siltoja, joissa routaantumisella ei pitäisi olla niin suurta vaikutusta mittaustulokseen. Tämän perusteella syksymittauksen tasoa muutettiin 0,5 mm pienemmäksi siten, että eri mittauskertojen taipumat ovat matalarakennekerroksisessa kallioleikkauksessa ja silloilla lähellä toisiaan.



Kuva 3.6. Liikennepaikkavälin Llh–Ylö talven ja syksyn mittaustulokset tulostettuna 1 m liukuvaa keskiarvoa käyttäen.

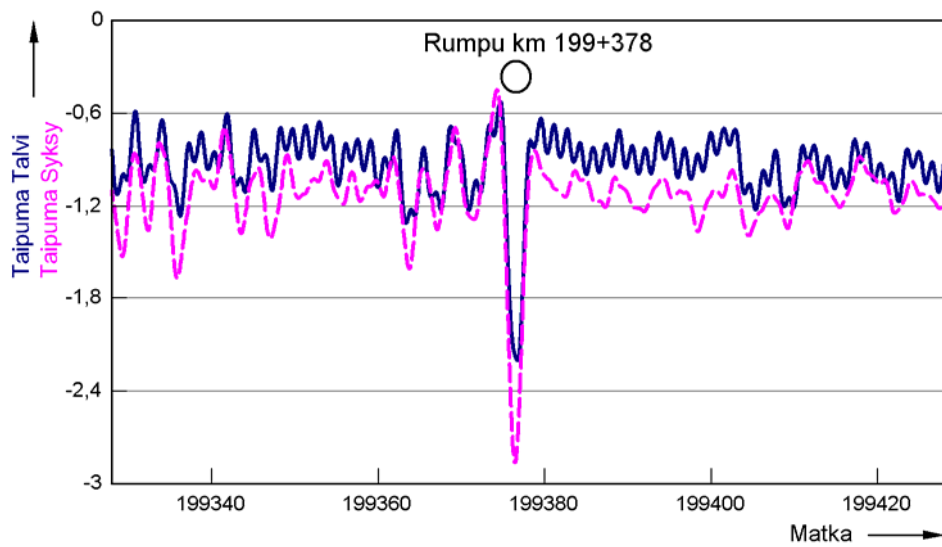


Kuva 3.7. Liikennepaikkavälin Llh–Ylö talven ja syksyn mittau tulokset tulostettuna 20 m liukuvaa keskiarvoa käyttäen.

Pitkästä liukuvasta keskiarvosta (Kuva 3.7) nähdään, että kallioleikkauksen km 197 kohta on nyt lähes samankaltainen molemmilla mittauskerroilla. Koko liikennepaikkavälillä keskimäärin talvimittauksen palautuva painuma on 0,88 mm ja syksymittauksen 1,25 mm. Palautuva painuma on talvimittauksessa tasaisempi koko mittausalueella, syksymittauksessa keskimääräinen taipuma hieman pienenee kilometrien kasvaessa. Talvimittauksen palautuva painuma on poikkeuksetta edelleen pienempi kuin syksymittauksen. Ainoastaan km 196+425 syksymittaus nousee talvimittauksen yläpuolelle, mutta sekin liittyy kohtaan, jossa tehtiin nopeudenmuutos syksymittauksessa (ks. luku 3.1.2).

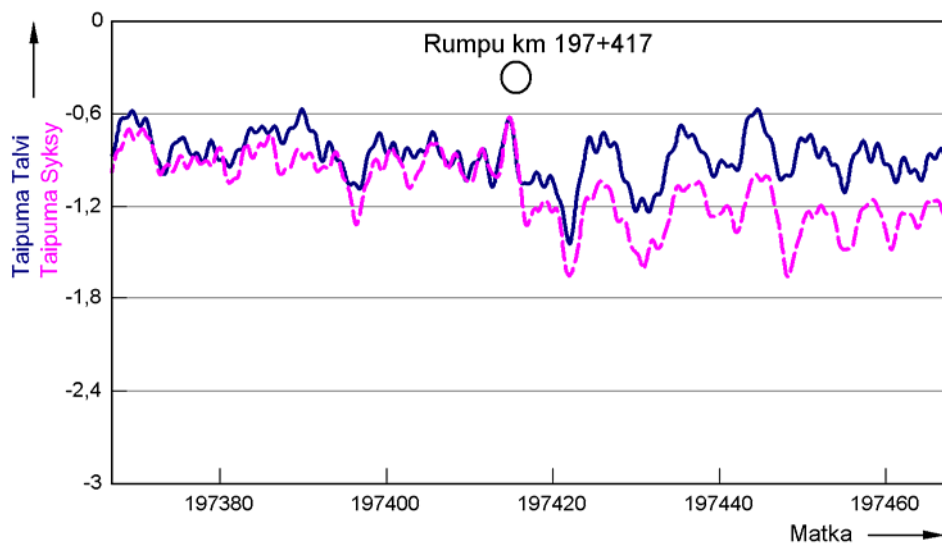
3.3.2 Ratarummut

Mittau tulosten tarkastelua tehtiin ensin siten päin, että vaikuttavatko tunnetut epäjatkuvuuskohdat palautuvan painuman arvoihin. Vertailussa ovat mukana molemmat mittauskerrat. Ensimmäisenä tarkastelukohteena olivat rummut. Näistä ainoastaan vesistöpenkereen rumpu km 199+378 näkyy selvästi suurena palautuvana taipumana (Kuva 3.8) ja muut rummut eivät käytännössä erotu kohinasta.

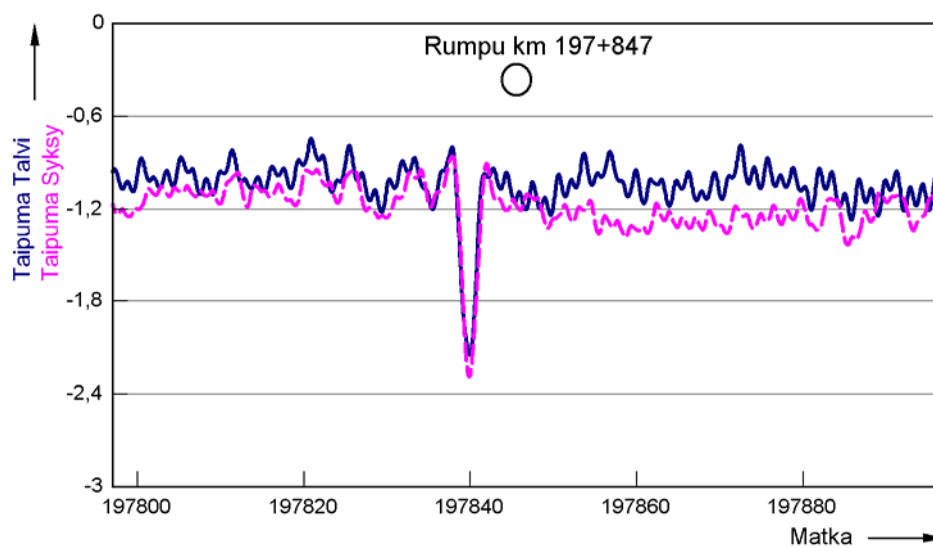


Kuva 3.8. Mittaustulos ratarummun km 199+378 kohdalta.

Myös rumpujen km 197+417 (Kuva 3.9) ja km 197+847 (Kuva 3.10) läheisyydessä näkyy yksittäisiä heikkoja kohtia, mutta rummut eivät osu aivan paikoilleen suuren palautuvan painuman kanssa. Näissä molemmissa kuvissa alkaa myös kallioleikkaus suuren palautuvan painuman kohdalta.



Kuva 3.9. Mittaustulos ratarummun km 197+417 kohdalta.



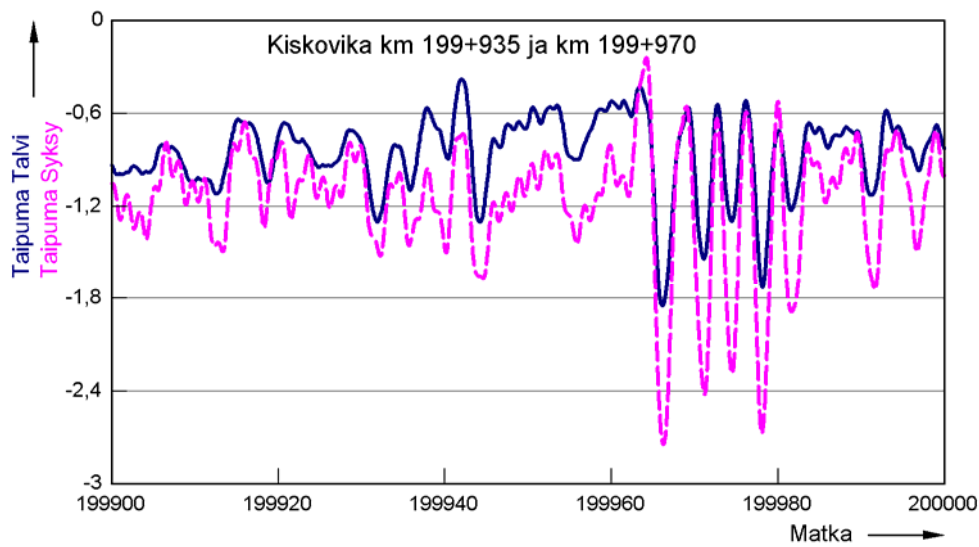
Kuva 3.10. Mittaustulos ratarummun km 197+847 kohdalta.

Ratarummut siis saattavat näkyä suurena palautuvana painumana, mutta ainakaan tällä liikennepaikkavälillä ne eivät yhtä poikkeusta lukuun ottamatta erotu datasta. Sen sijaan kallioleikkauksen alkaminen näyttäisi aiheuttavan joissakin tapauksissa selvän epäjatkuvuuskohdan.

3.3.3 Kiskoviat

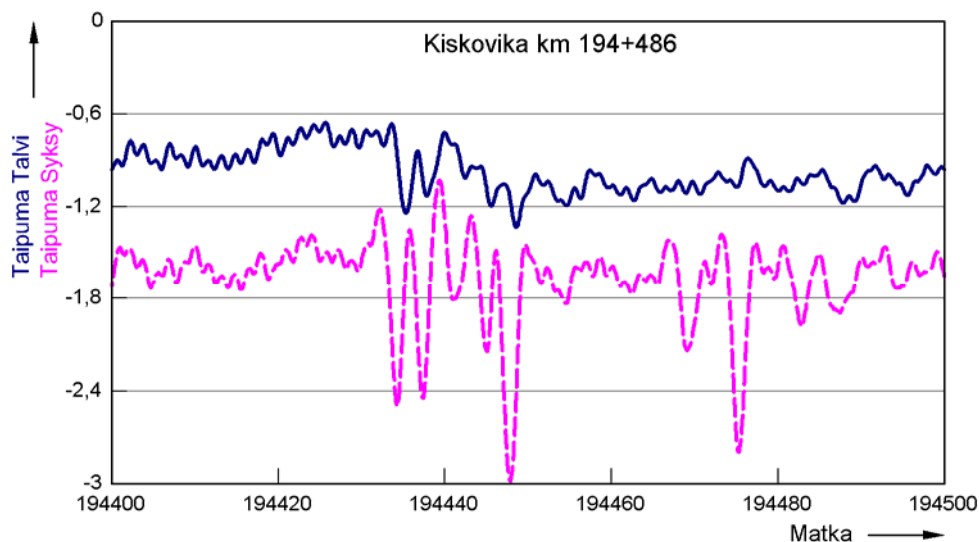
Toinen potentiaalinen tukikerroksen tuentatilaa heikentävä asia voisi olla kiskovika. Kiskovika aiheuttaa dynaamista kuormituslisää, joka voisi ilmetä tukikerroksen hienonemisena ja siten suurentuneena palautuvana painumana. Ratapurkkiin vietyjen kiskovikojen kohdilla ei kuitenkaan ole havaittavissa tämänkaltaista ilmiötä. Sinällään varsinaiset kiskoviat eivät näy mittauksessa suodatuksen takia, mutta mahdollinen heikentynyt tuentatila pitäisi näkyä.

Kiskovikarekisteristä löytyi merkinnät kiskovioista km 194+486, 197+275, 198+100, 199+354 ja 199+935 ja 199+970. Ensimmäisessä esimerkkikuvassa (Kuva 3.11) kaksi kiskovikakohdetta km 199+935 ja 199+970. Näistä ensimmäisessä kiskovian vaikutusta ei voi havaita, mutta kohdan ympäristössä on tavallista suurempaa vaihtelua sekä syksy- että talvimittauksessa. Maastokatselmuksessa selvisi, että jälkimmäinen kiskovika on hiljattain korjattu vaihtamalla kohtaan uudet kiskot. Ilmeisesti kiskojen vaihdon seurauksena tuenta on edelleen heikko välillä km 199+965–km 199+985 ja se aiheuttaa suurehkoja muutoksia palautuvassa painumassa. Itse asiassa kyseisen kohdan palautuvat painuman vaihtelut ovat koko mitatun pääratalinjan suurimpia.



Kuva 3.11. Mittaustulokset kiskovikapaikkojen km 199+935 ja km 199+970 läheisyydestä.

Toinen esimerkkikuva (Kuva 3.12) on km 194+486 merkityn kiskovian läheisyydestä. Tässä kohdassa rataa ei havaita jäykkyysmuutoksia, mutta ks. paikan läheisyydessä kylläkin. Maastokatselmuksen perusteella ainakin km 194+449 oli selvästi kiskovika, jonka kohdalla oli suuri palautuva painuma. Tästä osoituksena raidesepeli oli hioutunut ratapölkkyä vasten (Kuva 3.13). Samanlainen vika ilmentyi metreillä km 194+435, 438, 446 ja 449 eli kaikissa Kuva 3.12 huippukohdissa. Maastokatselmuksen perusteella ei pystytty arvioimaan syy-seuraussuhdetta kiskovian ja suurentuneen palautuvan painuman välillä. Talvimittauksessa ks. kohtaan liittyi myös palautuvan painuman tasoero, joka voisi viitata routalevyyn yms. eroon rakenteessa.

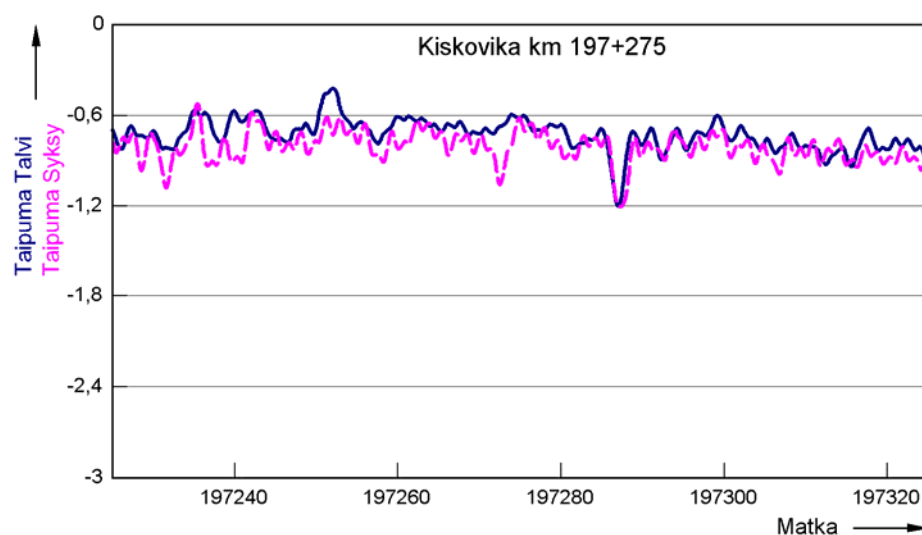


Kuva 3.12. Mittaustulokset kiskovian km 194+486 läheisyydestä.

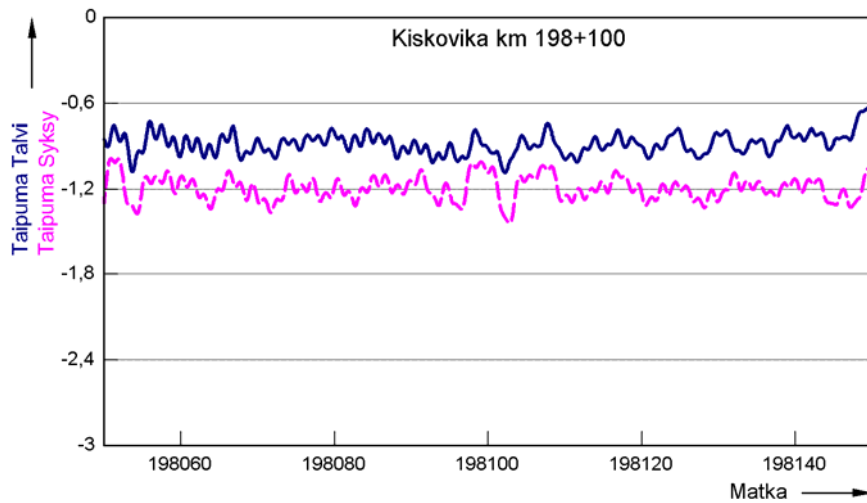


Kuva 3.13. Valokuva kiskovikakohteelta km 194+449.

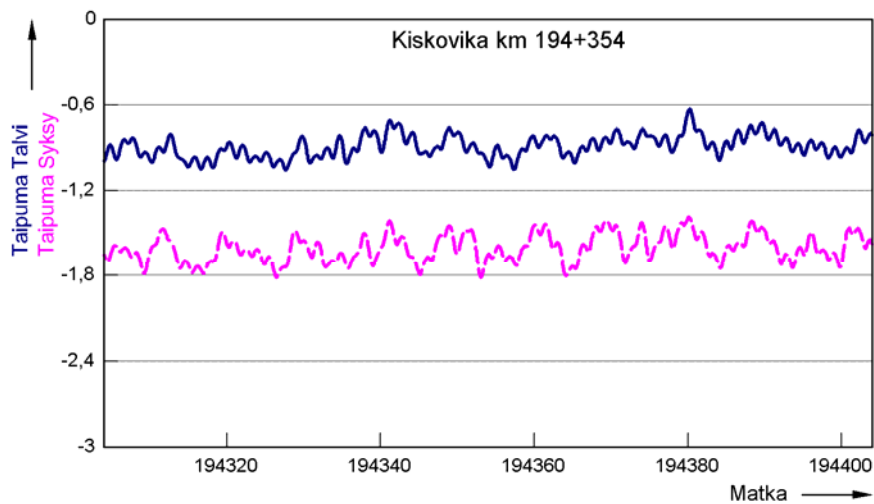
Muissa kiskovikakohteissa ei ollut selvää merkkiä suuresta palautuvasta painumasta, mutta pientä vaihtelua voidaan havaita jokaisesta kohdasta ehkä km 194+354 lukuun ottamatta. Täyttä varmuutta ei tietenkään ole myöskään siitä olivatko kiskoviat enää mittaushetkellä olemassa vai olivatko ne jo korjattu. Mittaustulokset kiskovikarekisteriin merkityistä kiskovikakohteista on esitetty kuvissa (Kuva 3.14–Kuva 3.16).



Kuva 3.14. Mittaustulokset kiskovian km 197+275 läheisyydestä.



Kuva 3.15. Mittaustulokset kiskovian km 198+100 läheisyydestä.



Kuva 3.16. Mittaustulokset kiskovian km 194+354 läheisyydestä.

3.3.4 Ratasillat

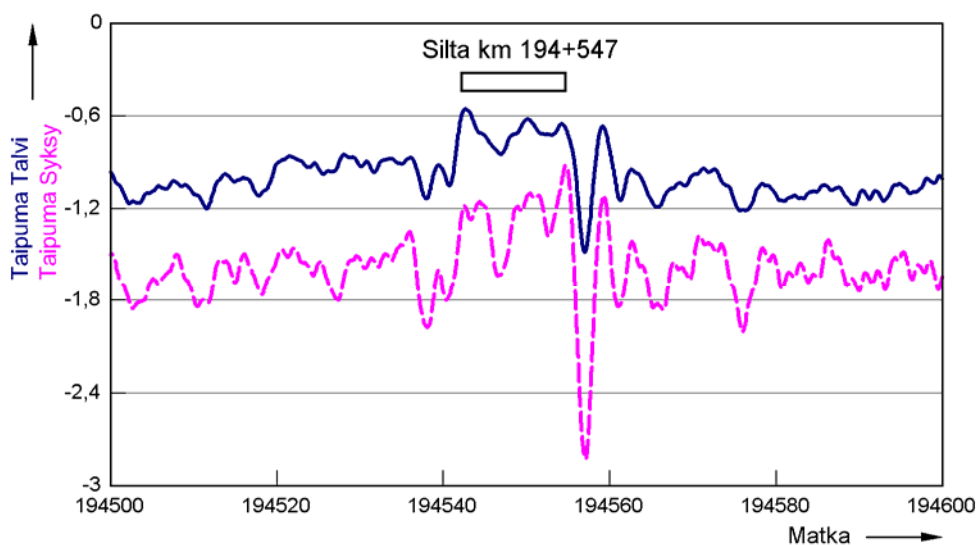
Lielähti–Ylöjärvi-rataosalla on viisi korkeusviivan alapuolella sijaitsevaa alikulkukäytävää tai ratasillaa, jotka voisivat vaikuttavaa radan jäykkyyteen. Nämä sillat on esitelty taulukossa (Taulukko 3.1).

Taulukko 3.1. Lielähti-Ylöjärvi-rataosan sillat, jotka sijaitsevat korkeusviivan alapuolella.

Sillan nimi	Sijainti (km)
Epilänharjun alikäytävä	194+547
Vihattulan alikulkusilta	196+233
Mäkkylän ja Niittyranan tilojen ak	198+897
Keijärven ratasilta	199+127
Koulupolun alikäytävä	200+128

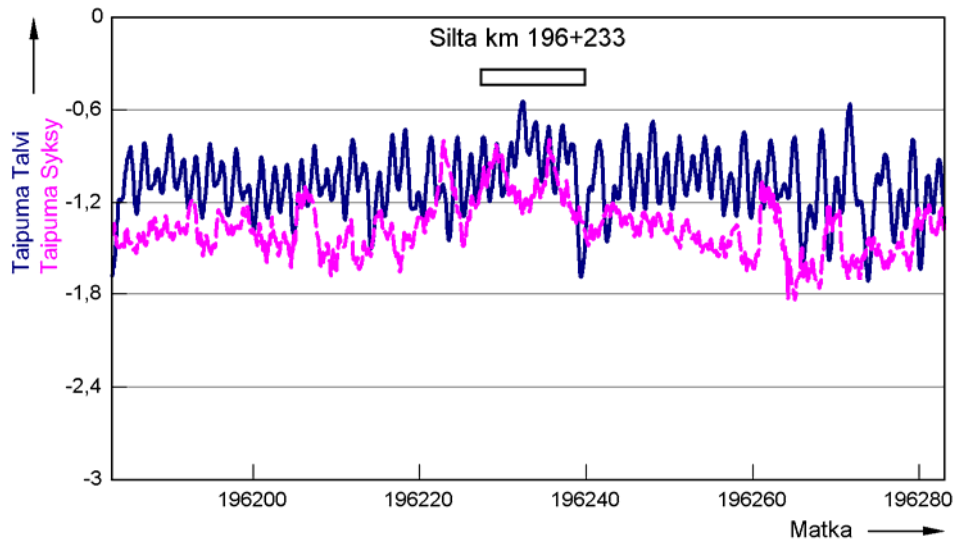
Seuraavissa kuvissa on esitetty radan palautuva painuma 50 metriä sillan keskipisteen molemmin puolin. Siltojen pituuksia ei tähän tarkasteluun selvitetty ja kuvissa esiintyvä siltaa kuvaava palkki on vain suuntaa antava.

Epilänharjun alikäytävän tapauksessa siltojen päädyt erottuvat selvästi heikon jäykkyyden takia (Kuva 3.17). Palautuva painuma siltakannella on hieman ympäröivää rataa pienempi, mutta tämä selittyy ainakin osin siltaa ympäröivillä routalevyillä. Sillan pohjoispäässä taipumakuoppa on syksymittauksessa selvästi talvimittausta suurempi. Eteläpäädyssä vuodenajalla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Kuopan pieneneminen talvella on hieman yllättävää, sillä se tarkoittaa sitä, että routaantuminen pienentää joustoa. Jos tavallista suurempi palautuva painuma aiheutuisi kokonaan huonosta tuennasta, ei palautuvan painuman pitäisi juurikaan pienentyä talvella. Tästä voisi päätellä, että ainakin osa suuresta joustosta tulee tukikerrosta syvemmältä, mutta sellaiselta alueelta, minne routa voi tunkeutua. Toisaalta routa voi pienentää myös huonon tuennan vaikutusta ja auttaa jakamaan kuormat paremmin kuin sula tukikerros. Tämän sillan osalta tuentatarve on kuitenkin ilmeinen melko lyhyellä aikavälillä.



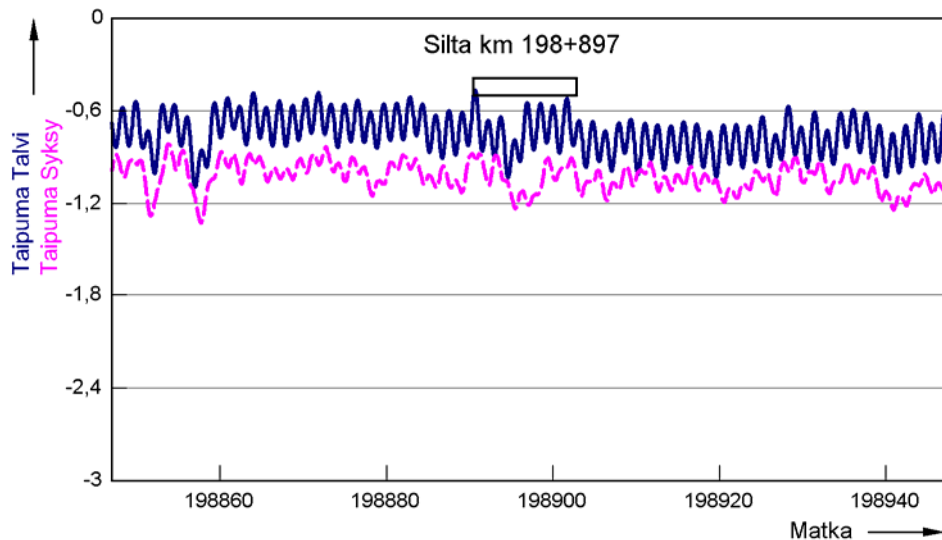
Kuva 3.17. Mittaustulokset Epilänharjun alikäytävän kohdalta.

Vihattulan alikulkusillan tapauksessa (Kuva 3.18) silta ei näy merkittävästi radan jäykkyydessä, mutta talvimittauksesta sillan pohjoispään paikan voi hyvällä tulkinnalla vielä paikallistaa, sillä pohjoispäässä on aavistuksen omainen kuoppa kuvaajassa. Syksymittauksessa sillan kohta erottuu hieman tavallista pienempänä taipumana, mutta ero ei ole kovin suuri eikä jyrkkäpiirteinen. Talvimittauksessa esiintyy selvä kohina, joka aiheutuu todennäköisesti itse mittalaitteen värähtelystä.



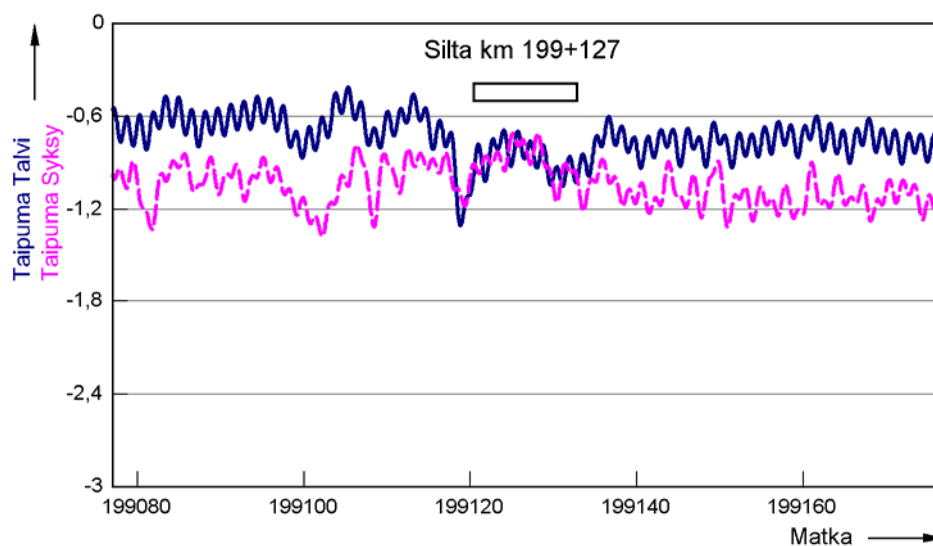
Kuva 3.18. Mittaustulokset Vihattulan alikulkusillan kohdalta.

Mäkkylän ja Niittyrannan tilojen alikulkusilta (Kuva 3.19) ei käytännössä erotu kohinasta. Kyseisessä kohdassa talvimittauksen säännöllinen kohina on tavallista suurempi. Kohinan voidaan olettaa aiheutuvan itse mittalaitteesta, ei niinkään radasta.



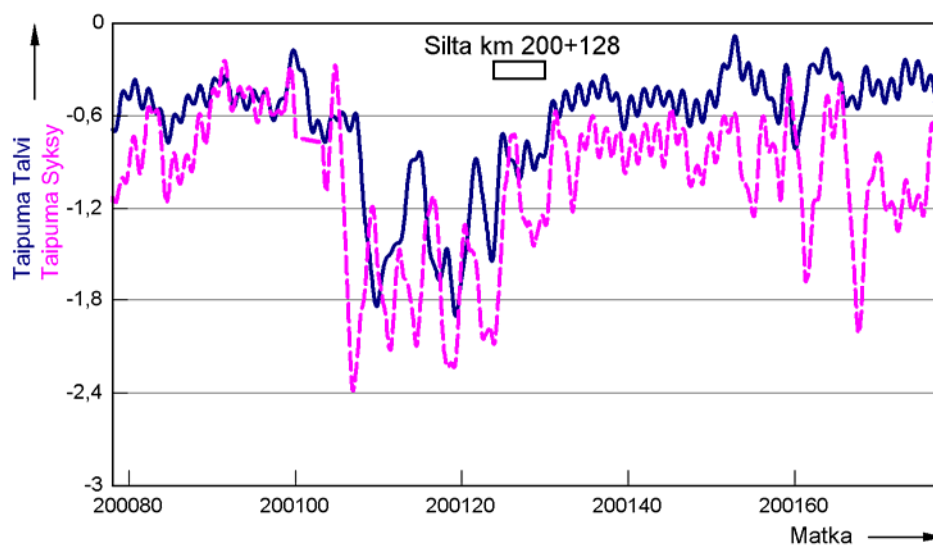
Kuva 3.19. Mittaustulokset Mäkkylän ja Niittyrannan tilojen alikulkusillan kohdalta.

Keijärven ratasilta erottuu mittaustuloksissa hieman (Kuva 3.20). Varsinkin sillan eteläpäädyssä on pieni taipumakuoppa, joka on yllättäen suurempi talvimittauksessa. Tämän voidaan olettaa aiheutuvan pääasiassa tuennan heikkenemisestä.



Kuva 3.20. Mittaustulokset Keijärven ratasillan kohdalta

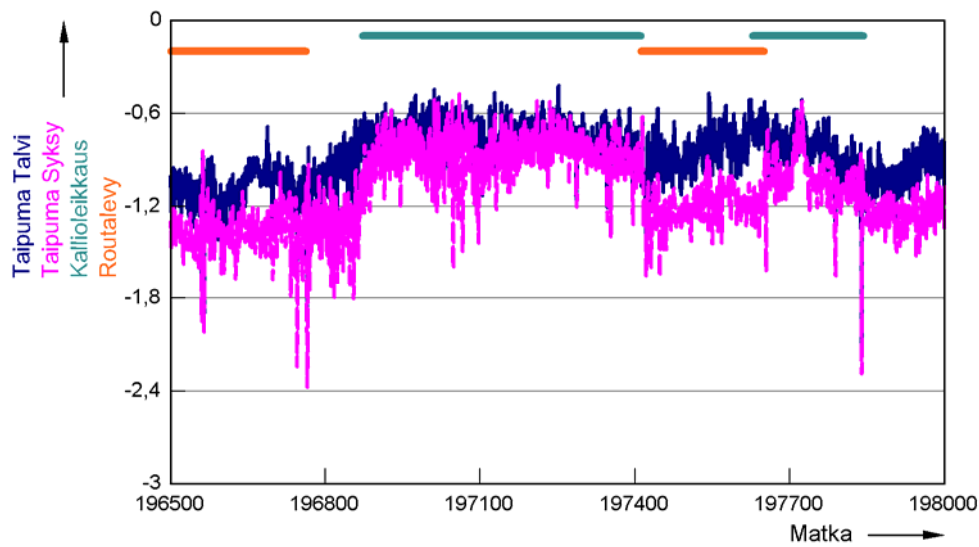
Koulunpolun alikäytävän kohdalla sijaitsee myös Ylöjärven vaihde V001 (Kuva 3.21). Vaihde erottuu mittaustuloksista paljon siltaa selvemmin. Vaihteen osalta samaa kohtaa on käsitelty myöhemmin luvussa 3.3.6.



Kuva 3.21. Mittaustulokset Koulunpolun alikäytävän kohdalta

3.3.5 Kallioleikkaukset

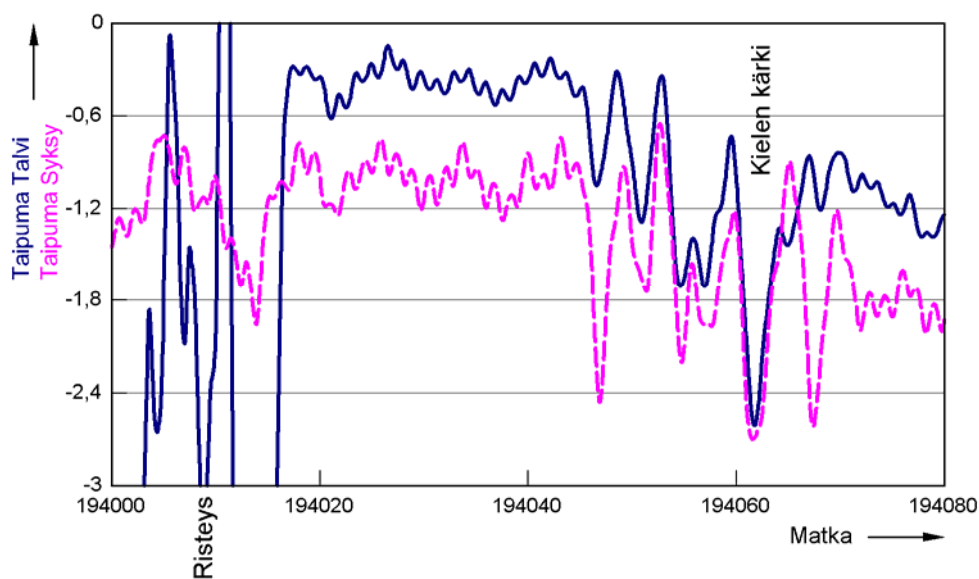
Tarkasteltavalla rataosalla sijaitsee kaksi kallioleikkausta, jotka ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Kallioleikkausten välissä on routalevytetty kohta, joka menee maatutkatulkinnan mukaan hieman päällekkäin kallioleikkausten kanssa (Kuva 3.22). Kallioleikkauksen vaikutus taipumiin tämän esimerkin valossa näyttäisi olevan noin 0,1...0,2 mm, kun routalevyn vaikutuksen oletetaan olevan (ks. luku 3.3.7) saman verran. Myös kallioleikkauksen kohdalla havaitaan suhteellisen suuria pistemäisiä taipumia. Nämä aiheutuvat todennäköisesti heikentyneestä tuentatilasta, sillä maa-rakenteiden jousto kallioleikkauksessa on hyvin rajallinen.



Kuva 3.22. Kallioleikkausten ja routalevyjen vaikutus palautuvaan painumaan.

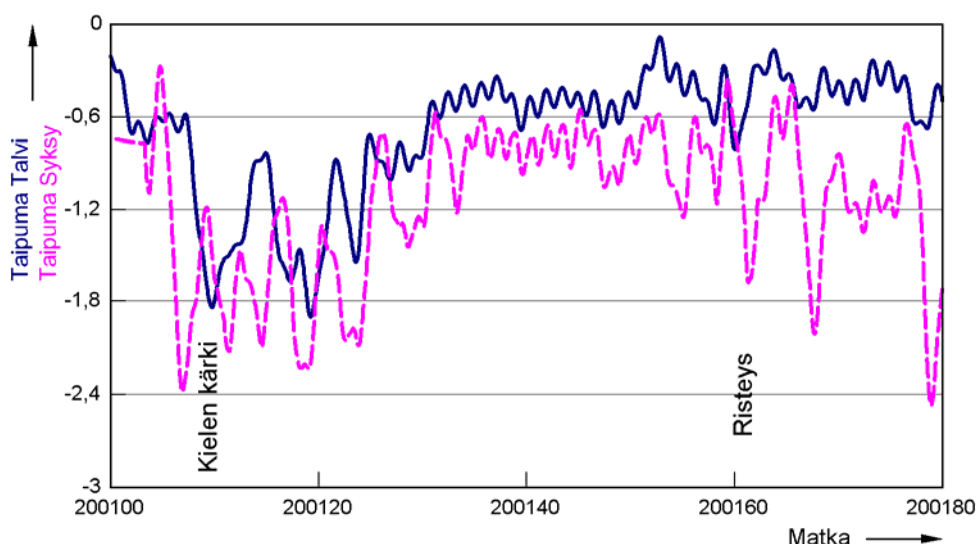
3.3.6 Vaihteet

Mittausalueella sijaitsee kaksi pääradan vaihdetta, Lielahdessa V706 ja Ylöjärvellä V001. Molemmat ovat tyyppiä YV60-900-1:18, Lielahdessa vasemmalle kääntyvä ja Ylöjärvellä oikealle kääntyvä. Mittaustulokset Lielahden vaihteesta V706 on esitetty kuvassa (Kuva 3.23). Mittaustulosten mukaan kielen alueella on selvästi muuta vaihdealuetta suuremmat taipumat. Mittaustulos on samankaltainen sekä syksyllä että talvella, tosin syksyllä pehmeitä kohtia näyttäisi olleen hieman enemmän. Takajatkoksen alue on talvella selvästi jäykempi, kuten rata yleensäkin. Talvimittauksen osalta risteyksestä etelään mittaus epäonnistui poikkeavalla raiteella olleen lumen takia. Syksyn mittauksen perusteella risteysalue olisi kielisovituksen tapaan joustavampi, mikä oletettavasti aiheutuu heikommasta tuentatilanteesta.



Kuva 3.23. Mittaustulokset Lielahden vaihteesta V706.

Ylöjärven vaihteesta V001 talvimittaus tehtiin läpiajona vaihteen yli, mutta syksymittauksessa mittalaite pysähtyi vaihteeseen apumiehen kyytiin ottamista varten (km 200+100). Tästä syystä syksymittauksessa saattaa olla pientä hidastamisesta aiheutuvaa mittausvirhettä. Mittaustulokset ovat kuitenkin hyvin samankaltaisia Lieilahden vaihteen kanssa. Kielisovituksen alueella on selvästi joustavampia kohtia ja risteys erottuu myös hieman. Ylöjärven vaihde sijaitsee osin sillan päällä (Koulupolun alikäytävä km 200+128), mikä osaltaan hankaloittaa tulkintaa (Kuva 3.24).



Kuva 3.24. Mittaustulokset Ylöjärven vaihteesta V001.

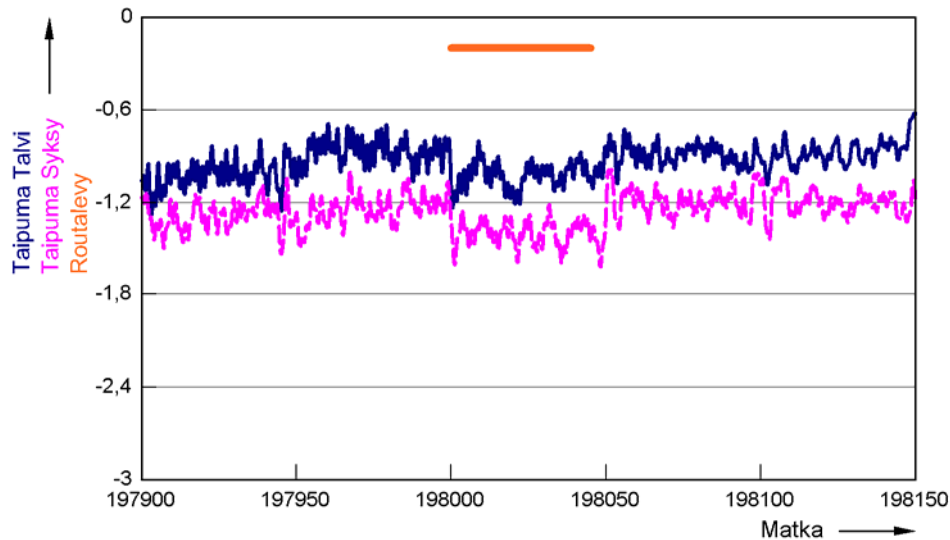
Yhteenvetona vaihteista voidaan todeta, että kielisovituksen kohdalta radan jäykkyys on jonkin verran keskimääräistä pienempi ja vaihtelu suurta. Vastaavaa voidaan todeta myös risteyskohdalta, vaikka siellä vaikutus oli selvästi vähäisempi. Mielenkiintoinen havainto on myös se, että palautuva painuma on lähes yhtä suuri syksyllä ja talvella kielisovituksen alueella, kun risteysalueella se on talvella selvästi pienempi. Tämän selitykseksi on olemassa kaksi hypoteesia: kielisovituksen alueella vaihdelämmitys pitää radan sulana tai tuentatilanne heikkenee roudan jäykkyyttä lisäävän vaikutuksen kanssa samassa suhteessa talven aikana.

3.3.7 Routalevyt

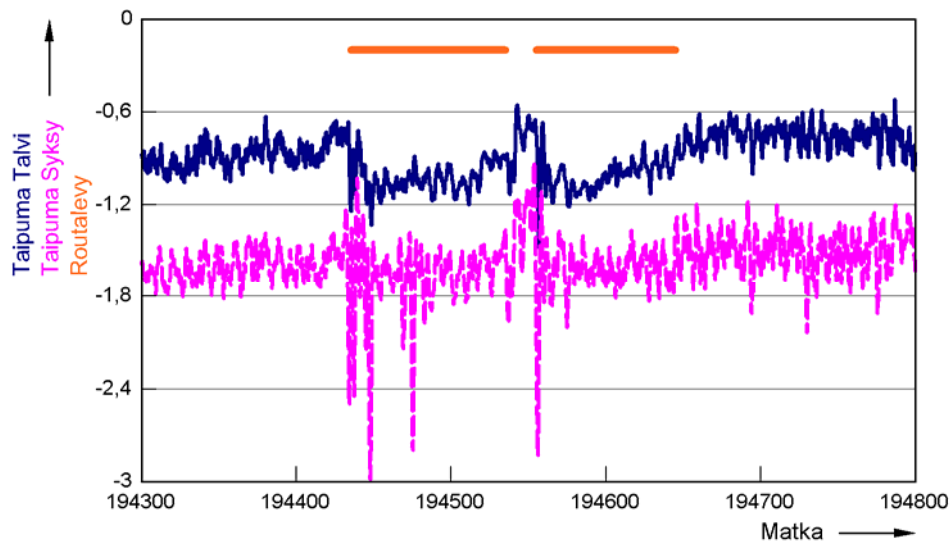
Routalevyt vaikuttavat radan jäykkyyteen usealla eri tavalla. Taipuma kasvaa keskimäärin routalevyjen kohdissa noin 0,1...0,2 mm. Taipuma ei kuitenkaan kasva selvästi kaikissa oletetuissa routalevykohdissa ja enimmillään kasvua tulee noin 0,3 mm. Routalevyn paksuus ja materiaali tietenkin vaikuttavat jouston suuruuteen. Tarkkaa tietoa rataosalla olevien routalevyjen ominaisuuksista ei tässä yhteydessä ollut käytettävissä eikä vertailua esimerkiksi siitä kasvaako taipuma levyn paksuuden suhteen pystytty tekemään.

Toinen selkeä havainto routalevyistä oli se, että noin puolessa routalevyjen alkamis- ja päättymiskohdissa on keskimääräistä suurempi taipuma. Syitä suurelle taipumalle voi olla useita, mutta oletettavasti ilmiö liittyy äkilliseen jäykkyyssmuutokseen, jonka seurauksena pysyvät muodonmuutokset kasvavat levyn alkamiskohdissa vähän samalla tavalla kuin siltapäädyissä. Toinen hypoteesi voisi liittyä johonkin rakentamisen tai kunnossapidon aikaiseen epäjatkuvuuteen, mutta tämän mekanismin selittäminen on vieläkin vaikeampaa.

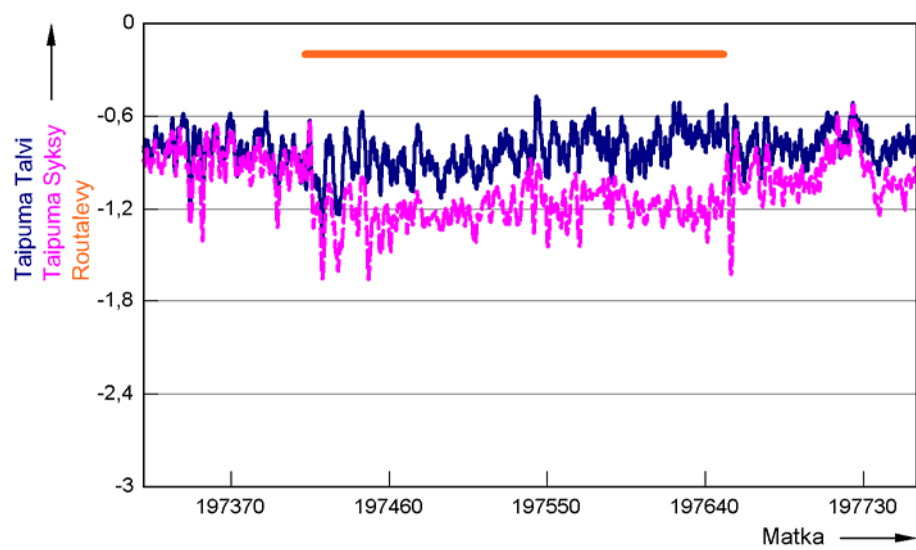
Kuvissa (Kuva 3.25–Kuva 3.31) on esitetty mittaustulokset routalevytetyistä kohdista mittaaväliltä. Neljässä ensimmäisessä kuvassa levyn vaikutus on selvästi nähtävissä ainakin syksymittauksessa, mutta kolmessa jälkimmäisessä kuvassa ei ole havaittavissa selvää tasomuutosta. Sen sijaan lähes kaikissa kuvissa havaitaan päätyilmiöitä kuten silloilla. Näiden tulkinta on kuitenkin vaikeaa, sillä ne saattavat aiheutua myös jostakin täysin muusta asiasta. Todennäköistä kuitenkin on, että suurentuneella palautuvalla painumalla olisi jotakin yhteyttä routalevytyksen alkamiseen.



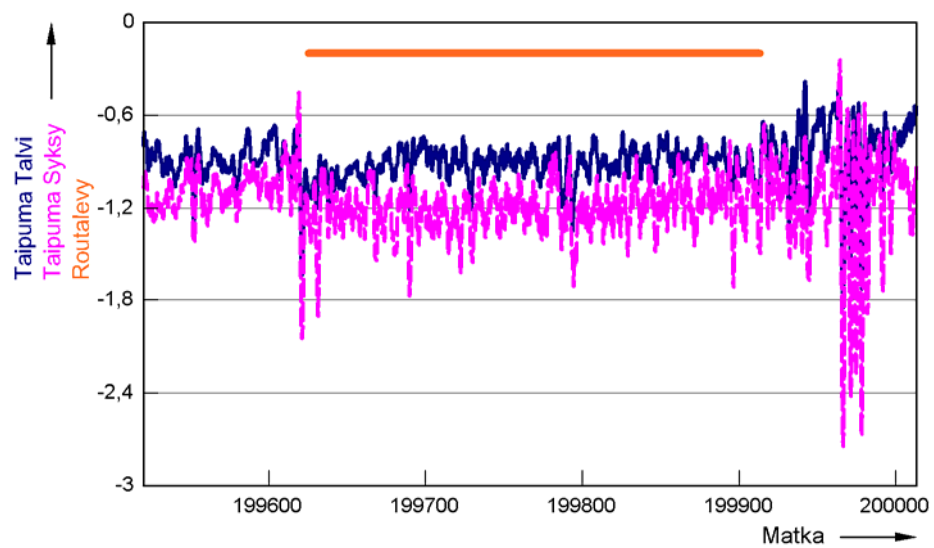
Kuva 3.25. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 198+000 - 198+050.



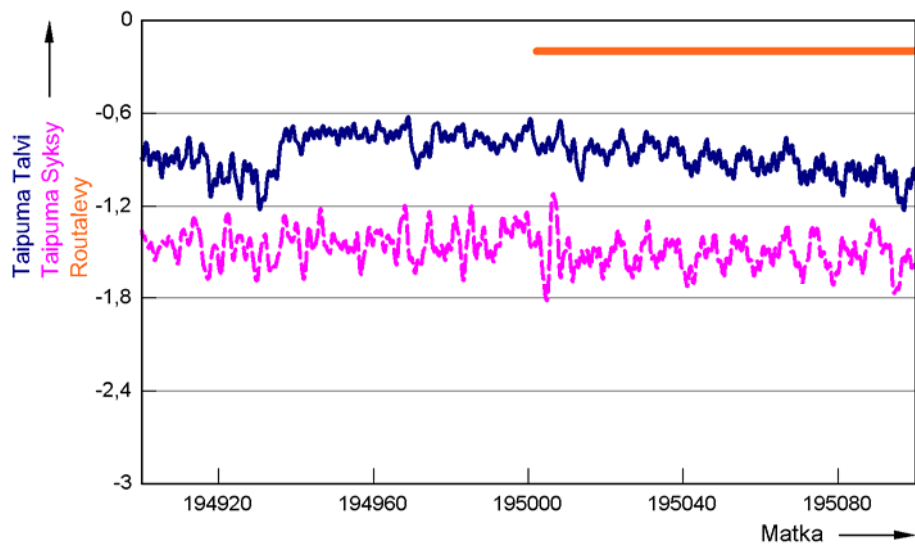
Kuva 3.26. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 194+440–194+650.



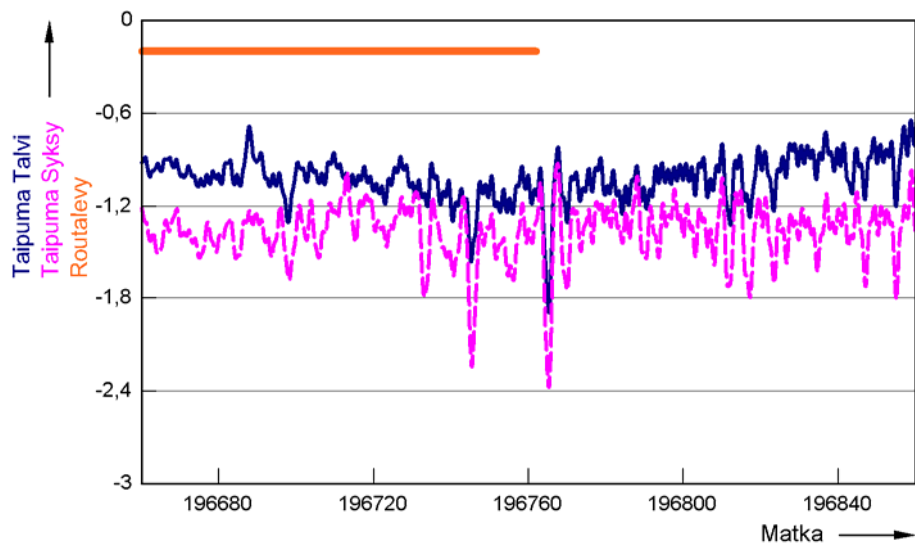
Kuva 3.27. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 197+410–197+660.



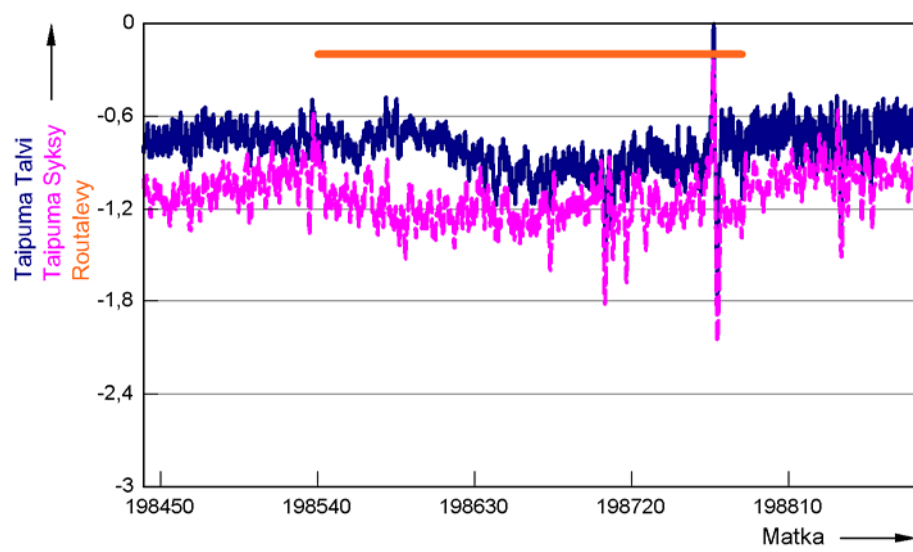
Kuva 3.28. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 199+620–199+930.



Kuva 3.29. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 195+000.



Kuva 3.30. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 196+770.

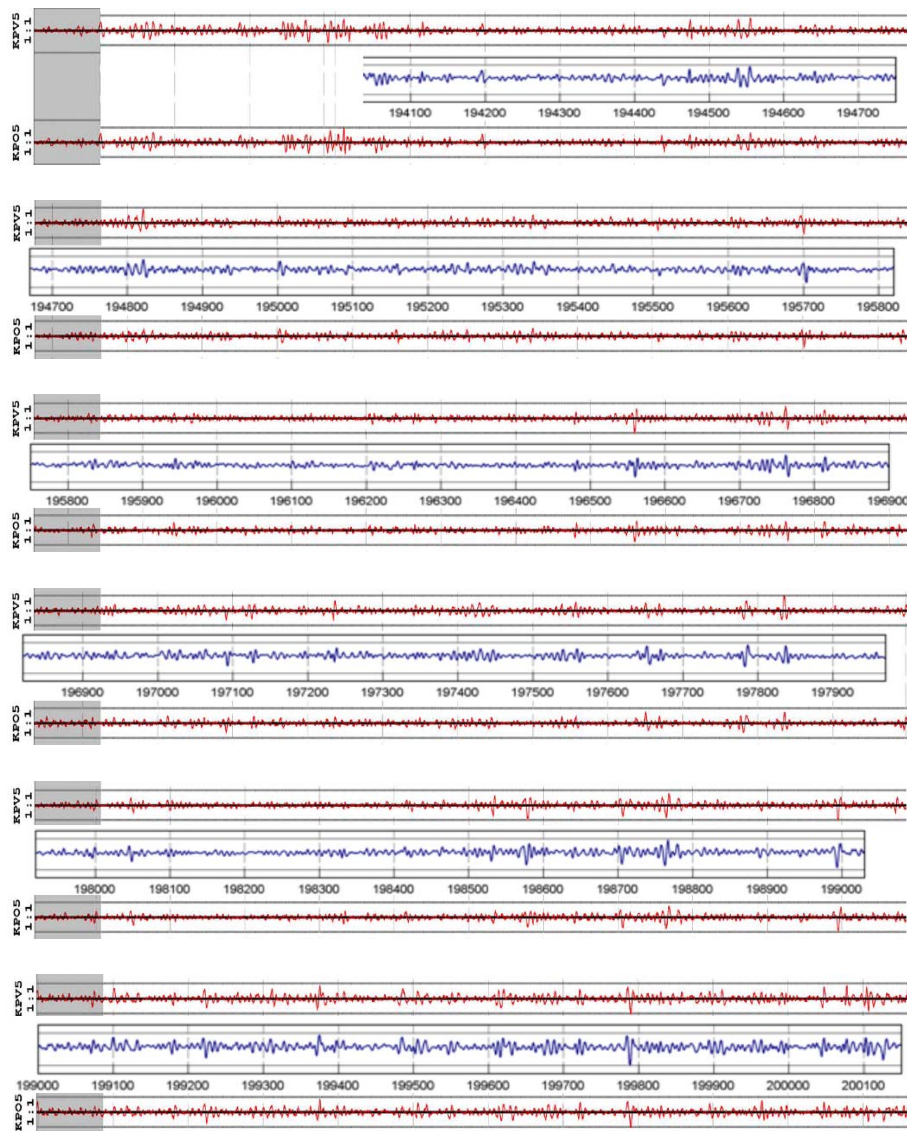


Kuva 3.31. Routalevyn vaikutus radan taipumaan km 198+540–198+780.

4 Geometrian ja taipuman välinen yhteys

4.1 Radantarkastusvaunun ja jäykkyysmittalaitteen datan vertailu

Radan jäykkyyden mittausvaunu mittaa taipuman laskentaa varten myös kiskojen korkeuspoikkeamat vastaavalla periaatteella kuin radantarkastusvaunu. Mittaus tehdään 6 metrin mittakannalla molempien kiskojen keskiarvona, kun taas radantarkastusvaunu Emmen tulokset ilmoitetaan 5 metrin mittakannalla molemmista kiskoista erikseen. Kuvassa (Kuva 4.1) on esitetty Emmalla mitatut korkeuspoikkeamat Llh–Ylö-rataosalta 4.3.2013 tehdystä mittauksesta (punaiset käyrät) ja näiden käyrien väliin on sovitettu radan jäykkyyden mittauslaitteen korkeuspoikkeaman mittaustulos 5.3.2013 (sininen käyrä) samaan mittakaavaan. Mittaustulosten yhteensovittaminen on tehty kuvina, sillä Emmen tuloksia ei ole saatavana numeerisessa muodossa.



Kuva 4.1. Lielähti–Ylöjärvi-liikennepaikkavälin korkeuspoikkeamat maaliskuussa 2013 määritettynä Emmalla ja radan jäykkyyden mittalaitteella.

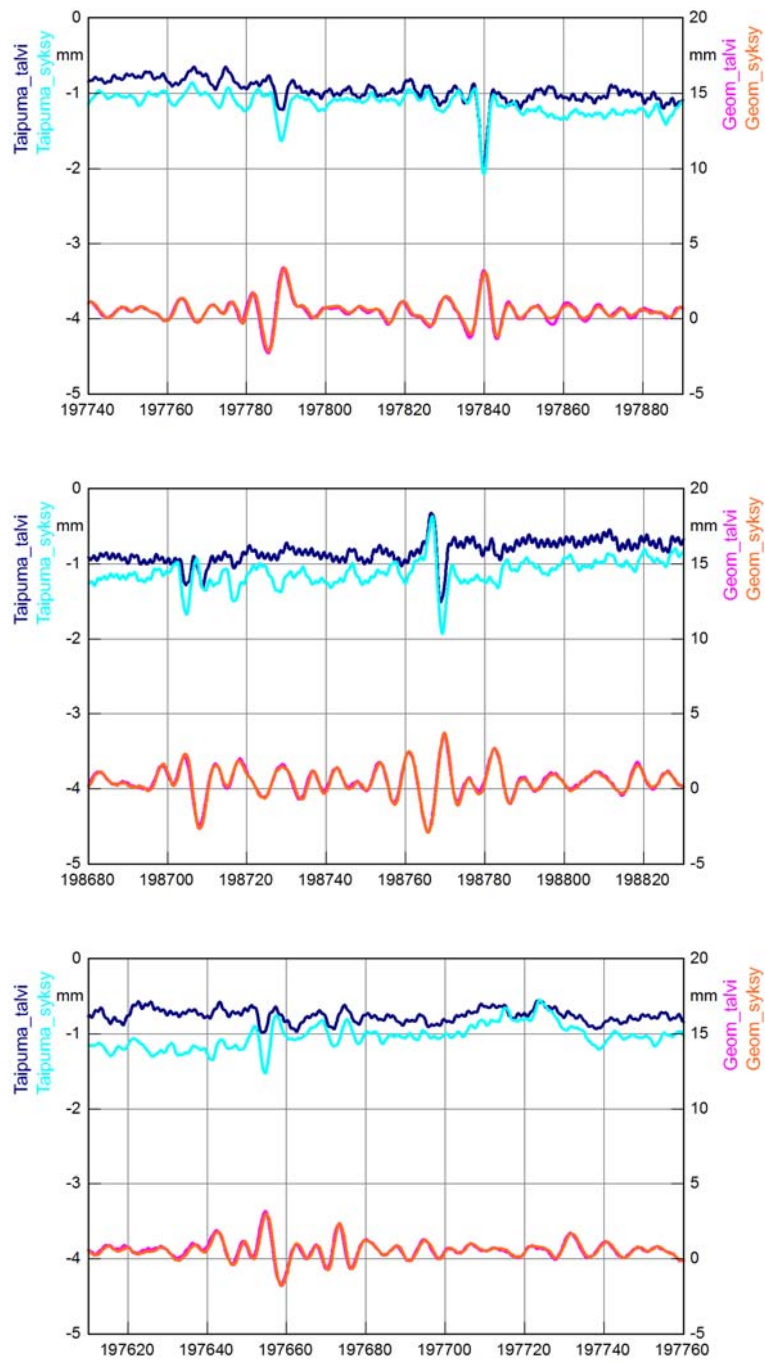
Kuvan (Kuva 4.1) eri laitteilla mitatut käyrät muistuttavat suuresti toisiaan. Käytännössä kaikissa kohdissa, joissa Emman mukaan on korkeuspoikkeamia, myös jäykkyyden mittausvaunun geometriamittaus havaitsee niitä. Varsinkin kun ajatellaan, että sinisen käyrän tulisi olla kahden punaisen käyrän keskiarvo, voi helposti todeta käyrien vastaavan kohtalaisen tarkasti toisiaan. Aiemmin luvussa 2.3.2 todetun perusteella käyrien ei edes pitäisi olla aivan samanlaisia, mutta tarkasteltavan mahdollistama tarkkuus huomioiden käyriä voidaan pitää ainakin muodoltaan samanlaisina.

Käyrien samankaltaisuus helpottaa jäykkyydsmittausten vertailua geometriavirheisiin, sillä edellä todetun perusteella jäykkyydsmittalaitteen mittaamaa korkeuspoikkeamaa voidaan pitää riittävän tarkasti oikeana. Vaikeus yhdistää tuloksia radantarkastusvaunun tuloksiin poistuu, kun vertailu voidaan tehdä suoraan saman laitteen kesken. Ainut haaste liittyy virherajan suuruuden määrittämiseen. Kuvan (Kuva 4.1) Stiffmasterin virherajoiksi on piirretty ± 5 mm, jotka vastaavat jokseenkin radantarkastuksen D-luokan virherajoja. Kunnossapitotasolla 1A D-luokan virherajat ovat kuitenkin vain ± 4 mm viiden metrin mittakannalla. Eroa syntyy hieman erilaisesta mittakannasta (5 ja 6 metriä) ja osittain siitä, että symmetrinen pyöräväli kadottaa osan taajuuksista. Jäykkyydsmittavaunun korkeuspoikkeaman mittaustulosta ei ole myöskään korjattu muuntofunktioita käyttäen. Käyttämällä skaalausta 0,8 jäykkyydsmittalaitteen tulos muuttuu kohtalaisen tarkasti radantarkastusvaunun mittaustulosta vastaavaksi.

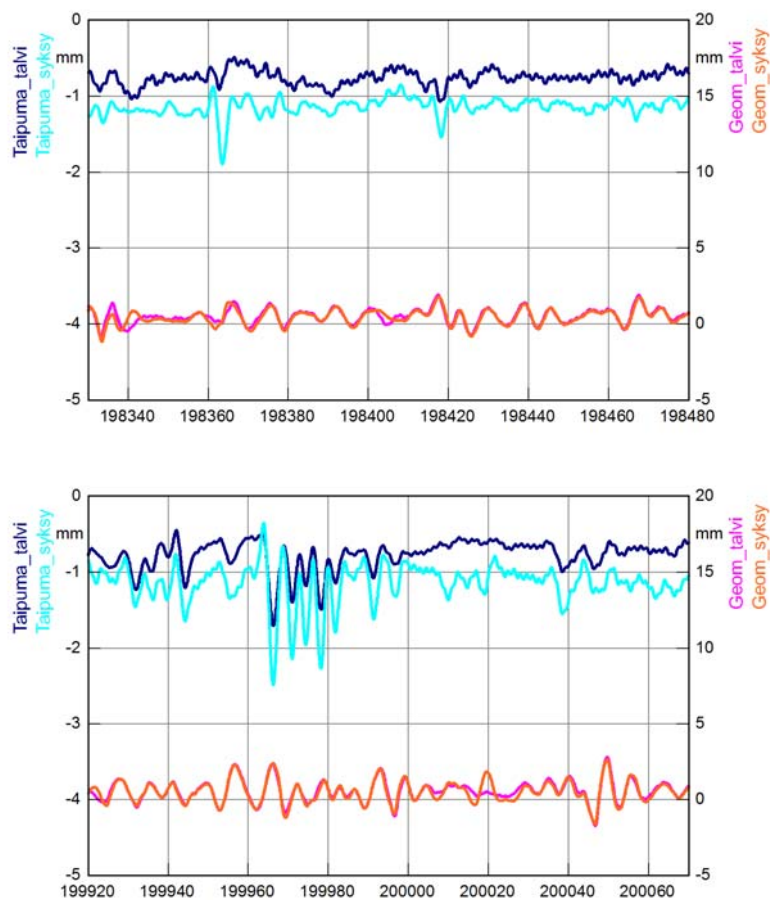
4.2 Geometrian ja palautuvan painuman yhteys

Yhtenä tutkimuksen kimmokkeena on ollut oletus, että geometriavirheet syntyvät radalla sellaisiin paikkoihin, joissa on jäykkyyseroja. Tässä geometriavirheillä ei tarkoiteta nimenomaisesti virheluokituksen mukaisia virheitä vaan ylipäätään vaihtelua geometriassa.

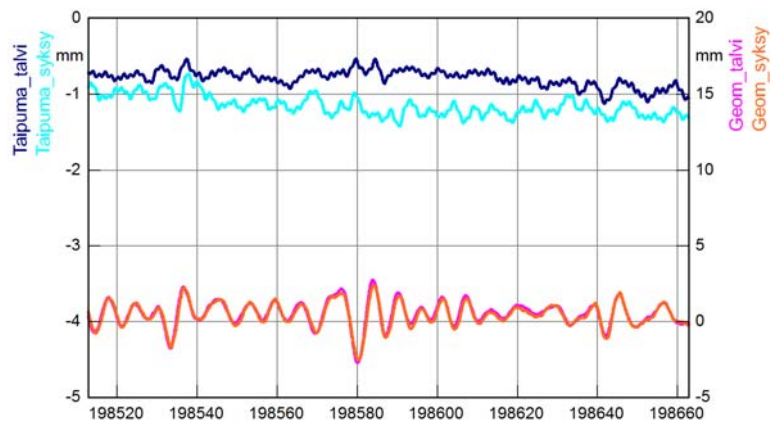
Geometrian ja palautuvan painuman välinen vertailu osoittaa oletuksen toteutuvan monin paikoin, mutta aiheuttaa samaan aikaan paljon kysymyksiä. Useimmiten jäykkyysvaihtelun kanssa esiintyy myös geometriavirheitä kuten kuvassa (Kuva 4.2), mutta ei aina kuten kuva (Kuva 4.3) osoittaa. Toisaalta geometriavirheitä esiintyy myös kohdissa, joissa ei ole jäykkyyseroja (Kuva 4.4).



Kuva 4.2. Radan jäykkyyssvaihteluksia, joissa myös geometriassa on virheitä.



Kuva 4.3. Radan jäykkyysvaihtelukohtia, joissa ei ole selkeitä geometriavirheitä.



Kuva 4.4. Radan geometriavirheitä, joiden kohdalla ei ole selkeää jäykkyysvaihtelua.

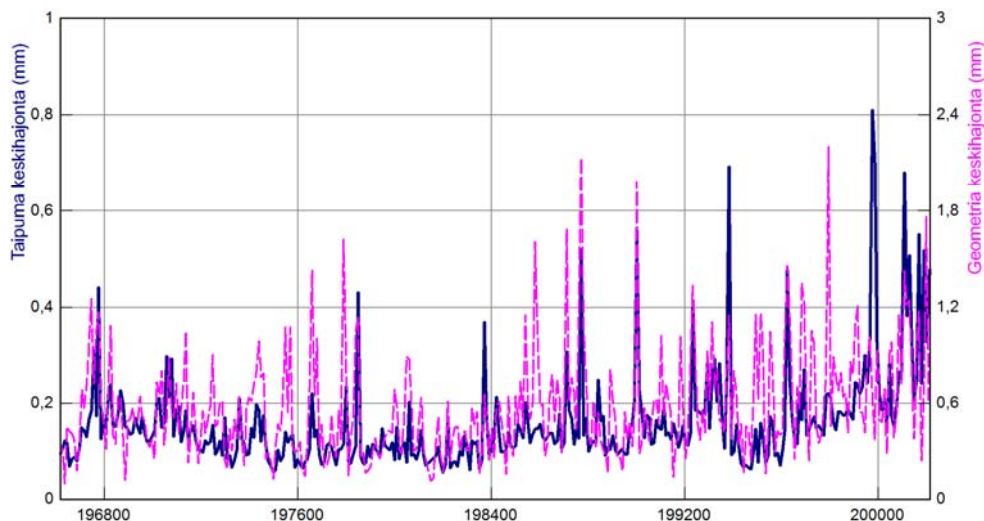
Yleispätevää syytä osittaiseen korrelaatioon jäykkyyserojen ja geometriavaiheluiden välille on kovin hankala antaa, mutta joitakin hypoteeseja voidaan esittää. Jäykkyysvaihtelun esiintyminen ilman geometriavirhettä viittaa lähiaikoina tehtyyn kunnossapitoon eli geometria on tuettu hyväksi ja geometrian heikkeneminen taas tulevaisuudessa on odotettavaa.

Geometriavirheen esiintyminen ilman jäykkyyseroa voisi aiheutua kunnossapidossa syntyneestä epätasaisuudesta. Jo alkavista geometriavirheistä aiheutuva dynaaminen kuormitus voisi nopeuttaa epätasaisista sepelin jauhaantumista tai penkereen pysyvää muodonmuutosta, mikä pitkällä aikavälillä tuottaa geometriavirheen kohtaan, jossa ei ole varsinaista jäykkyyseroa. Toisaalta kiskoissakin saattaa olla varomattoman käsittelyn tai liian pitkään jatkuneen huonon tuennan vuoksi aiheutunutta pysyvää taipumaa, joka saattaa ilmetä geometriavirheenä ilman jäykkyysvaihtelua.

Edellä esitettyjen kuvaajien tulkinnassa on syytä huomioida, että kuvien asteikot geometrialle ja taipumalle ovat erilaiset. Molempien suureiden yksikkö on millimetriä eli geometriavaihtelut ovat karkeasti noin viisinkertaiset jäykkyysvaihteluihin verrattuna. Toinen tekninen seikka liittyy virheiden paikkaan. Jäykkyyskäyrä on esitetty ratametrien suhteen oikein, mutta geometriakäyrässä jäykkyyseron aiheuttama paikallinen kuoppa näkyy geometriassa 6 metrin matkalla ensin korkeuspoikkeamana alaspäin, toisen pyörän ylittäessä pisteen poikkeamana ylöspäin ja kolmannen pyörän ylittäessä pisteen on poikkeaman suunta jälleen alaspäin.

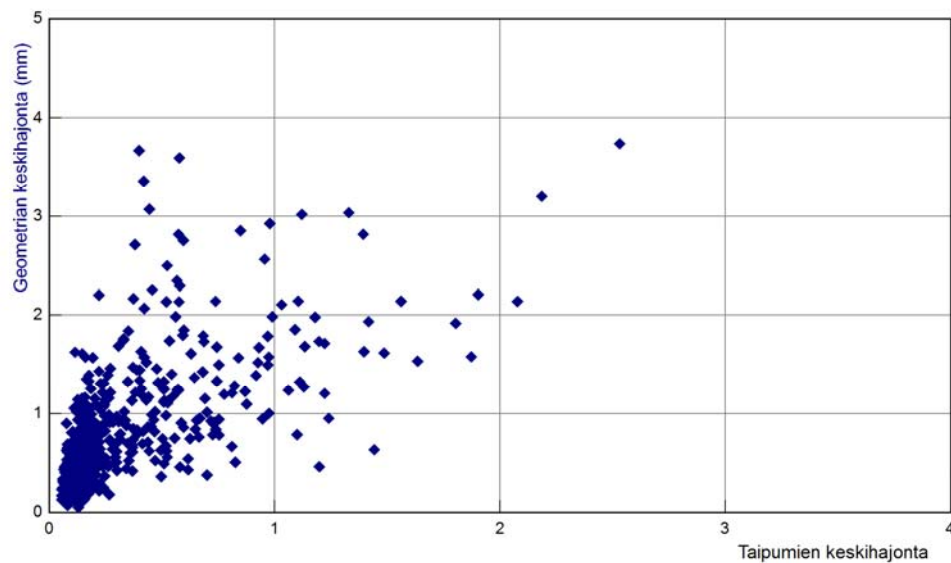
Yleisesti ottaen erot geometriassa syksyn ja talven mittauksen välillä ovat erittäin pieniä. Edellä esitetyissä esimerkeissä vain kuvassa (Kuva 4.3) havaitaan edes jonkinasteista eroa eri mittausten välillä. Tästä voi päätellä muun muassa sen, että geometria ei käytännössä muutu talven aikana ellei routanousua esiinny.

Geometrian ja palautuvan painuman vertailu suoraan piste pisteeltä ei tuota yksiselitteistä tulosta. Korrelaatiota varten molemmat suureet ikkunoitiin 10 metrin pituisiksi osuuksiksi ja laskettiin ikkunoiden keskihajonnat (Kuva 4.5). Matkan suhteen piirrettä kuvasta havaitaan, että osa suurista geometria- ja jäykkyysvaihteluista osuu samoihin kohtiin, mutta paljon on myös niitä kohtia, joissa geometria vaihtelee, mutta jäykkyys ei. Vain muutamassa kohdassa jäykkyysvaihtelut ovat selvästi geometriavaihteluita suurempia.



Kuva 4.5. Geometrian ja taipuman 10 metrin ikkunoihin lasketut keskihajonnat.

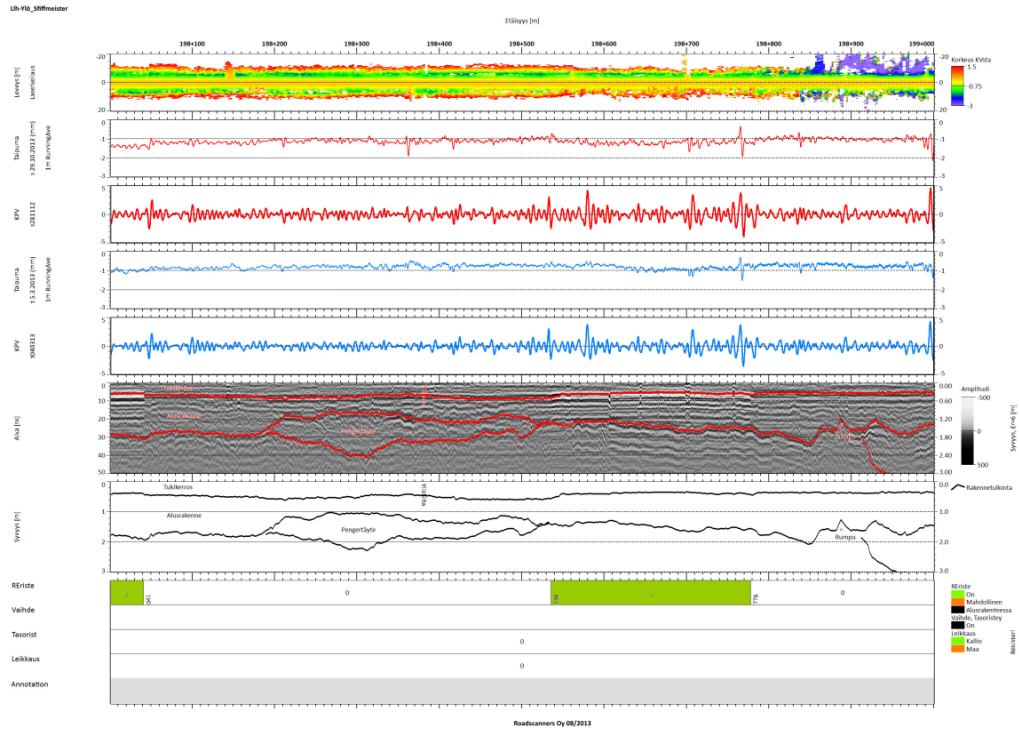
Vastaavan korrelaation voi piirtää myös kuvaajaan siten, että palautuvan painuman keskihajonta on vaaka-akselilla ja geometrian keskihajonta pystyakselilla (Kuva 4.6). Tarkastelutavassa hajonta on suuri, mutta kuvaajasta voi erottaa havaintopisteiden pääjoukon, jolle kulmakerroin on noin 6. Tämä tarkoittanee yleisintä havaintojoukkoa, jossa geometriavaihtelu on kuusinkertaista palautuvan painuman vaihteluun verrattuna. Havainnon voidaan nähdä viestivän siitä, että geometriaongelmat lisääntyvät taipumien vaihdellessa lisääntyvän dynaamisen liikennekuormituksen seurauksena. Tämän lisäksi kuvaajasta erottuu hieman ryhmä, jossa geometrian hajonta on yhtä suurta palautuvan painuman hajonnan kanssa. Tämä ryhmä edustanee tilannetta, jossa geometriavaihtelua ei mittausajankohtana juurikaan ole, mutta jäykkyysvaihtelu on suhteellisesti katsottuna suurta.



Kuva 4.6. Geometrian ja taipuman keskihajontojen korrelaatio.

4.3 Mittaustulosten tulkinta Railway Doctor -ohjelmistolla

Edellä esitetyt esimerkit kertovat selkeästi sen, että yksistään radan jäykkyystieto ei kerro paljoakaan radan kunnosta ja siihen vaikuttavista asioista. Ilmiöiden syy-seuraussuhteiden ymmärtämiseksi tarvitaan tieto geometriasta ja kaikista radassa olevista laitteista ja rakenteista. Vasta tämän jälkeen alkaa syntyä kokonaiskuva siitä, mistä geometriavirheet ja jäykkyyserot saavat alkunsa. Kuvassa (Kuva 4.7) on esitetty yksi esimerkki Roadscanners Oy:n tuottamasta yhteenvedosta, jossa jäykkyys, geometria ja rakennekerrostiedot on yhdistetty samaan kuvaan. Esimerkiksi routalevyjen, siltojen ja rumpujen vaikutus tulee esiin aivan uudella tavalla. Esitystavan avulla on mahdollista päästä suunnittelemaan juuri oikeat parantamistoimenpiteet juuri oikeisiin kohteisiin.



Kuva 4.7. Esimerkki jäykkyystiedon yhdistämisestä maatutkatietoon Railway Doctor -ohjelmistossa.

5 Radan jäykkyyden modifiointimahdollisuudet

Tässä luvussa käydään läpi yleisellä tasolla, miten radan eri komponentit vaikuttavat radan jäykkyyteen, mutta useimmiten tarkastelu tehdään palautuvan painuman avulla. Useissa alaluvuissa teoreettisen pohdinnan tueksi on käytetty mittaushavaintoja oikealta radalta ja erilaisista laboratoriomittakaavan koejärjestelyistä.

5.1 Kiskot

5.1.1 Kiskoprofiili

Kiskon kokoonpuristuma on oletusarvoisesti niin pieni, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon jäykkyydestä tarkastelussa. Teräksen kimmomoduuli on noin 210 GPa ja maa- materiaalien kimmomoduulit ovat suuruusluokassa tuhat kertaa pienempiä. Kiskon taiputusvastus kuitenkin vaikuttaa siihen, miten laajalle alueelle akselikuorma jakautuu ja sitä kautta alapuolisten rakenteiden muodonmuutoksiin ja myös palautuvan painuman arvoon. Palkin taipuman laskemiseen kimmoisella alustalla on esitetty matemaattiset teoriat mm. Zimmermannin toimesta. Myös tämän tutkimuksen väliraportissa on tarkasteltu tätä aihetta (Peltokangas et al. 2013). Kiskon taipuma voidaan määrittää esimerkiksi yhtälöillä 5.1 ja 5.2. Kun tarkastellaan kiskon taipuman yhtälöä $y(x)$, kiskon jäyhyysmomentti I vaikuttaa ainoastaan karakteristiseen pituuteen L . Tätä termiä on neljässä kohdassa yhtälössä 5.1, mutta maksimitaipuman kohdalla $x=0$ Neperin lukuun perustuva termi saa arvon 1 ja sulkulausekkeiden sisältö saa niin ikään arvon 1. Siten kiskon jäyhyysmomentin vaikutus maksimitaipumaan ratkeaa pelkästään yhtälön 5.1 ensimmäisen lausekkeen avulla.

$$y(x) = \frac{Q_d}{2uL} \cdot e^{-\frac{|x|}{L}} \left(\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{L}\right) \right) \quad (5.1)$$

missä

$y(x)$	on kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x [mm]
Q_d	pystysuuntainen pyöräkuorma [N]
u	ratamoduuli [N/mm/mm]
e	Neperin luku $\approx 2,718$ [-]
x	pituuskoordinaatti, origo kuormituspaikassa [mm]
L	karakteristinen pituus tai peruspituus (<i>characteristic length, base length</i>), joka voidaan määrittää yhtälöllä 5.2 (Skoglund 2002)

$$L = \left(\frac{4EI}{u} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.2)$$

missä

E	on kiskomateriaalin kimmomoduuli [MPa]
I	kiskon jäyhyysmomentti [mm ⁴]

Jäykempi kisko jakaa kuormituksen laajemmalle ja siten palautuvan painuman arvo on pienempi kuin taipuisammalla kiskolla. Kiskon jäyhyysmomentteja on esitetty Rato 11:ssä ja osa niistä on esitetty myös taulukossa (Taulukko 5.1). Jäyhyysmomentti kasvaa ääritapausten K30 ja 60E1 välillä nelinkertaiseksi. Jos oletetaan, että ratamoduuli u ei muutu kiskon taivutusvastuksen vaikutuksesta, yhtälöiden 5.1 ja 5.2 mukaisesti jäykimmän kiskon jäyhyysmomentin vaikutus pienentää maksimitaipumaa vain 30 % joustavimpaan kiskoon verrattuna. Kahdesta pääraiteilla yleisimmin käytössä olevasta kiskotyypistä 60 E1 pienentää maksimitaipumaa 6 % 54 E1 kiskoon verrattuna. Tarkastelussa on syytä huomioda, että ratamoduuli u määrittää lopulta maksimitaipuman absoluuttisen suuruuden.

Taulukko 5.1. Kiskotyyppien jäyhyysmomentteja (RATO 11).

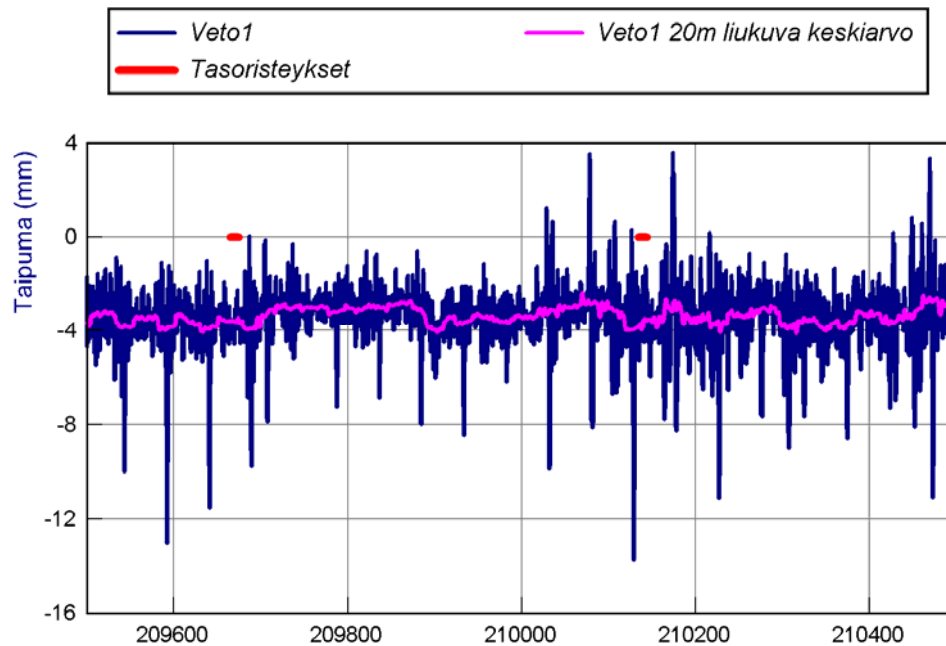
Kiskotyyppi	Jäyhyysmomentti (10^4 mm^4)
K30	734
K43	1469
54 E1	2346
60 E1	3055

5.1.2 Kiskojatkokset

Kiskojen liitostapa vaikuttaa merkittävästi palautuvan painuman lukuarvoon. Jatkuvaaksi hitsatuilla kiskoilla jatkoksia ei huomata jäykkyysmittauksessa ennen kuin jatkokseen alkaa tulla pysyvää muodonmuutosta. Hitsauskohdan teräs on usein pehmeämpää kuin kisko yleensä ja hitsi on siten alttiimpi pysyville muodonmuutoksille (Kauppinen, 2011). Pysyvän muodonmuutoksen syntymisen jälkeen jatkoskohtaan alkaa syntyä liikkuvan kaluston aiheuttamaa dynaamista kuormituslisää, mikä johtaa entistä nopeampaan hitsin muokkautumiseen ja pysyviin muodonmuutoksiin myös maarakenteissa. Etenkin tukikerroksen hienontuminen ja tuentatilan heikkeneminen nopeutuu. Tämän seurauksena jatkoskohtaan alkaa muodostua roikkuvia pölkkyjä, jotka näkyvät jäykkyysmittauksessa. Lielähti-Ylöjärvi -liikennepaikkavälin mittauksissa tällaisia kohtia oli muutama hitsatuissa kisko jatkokseissa. Selkeimmin mittauksissa havaittiin heikentyneitä tuentatiloja eristysjatkosten kohdilla. Tämä on luonnollista, sillä eristysjatkoksissa on selkeä epäjatkuvuuskohta, joka on alttiimpi muodonmuutosten syntymiselle.

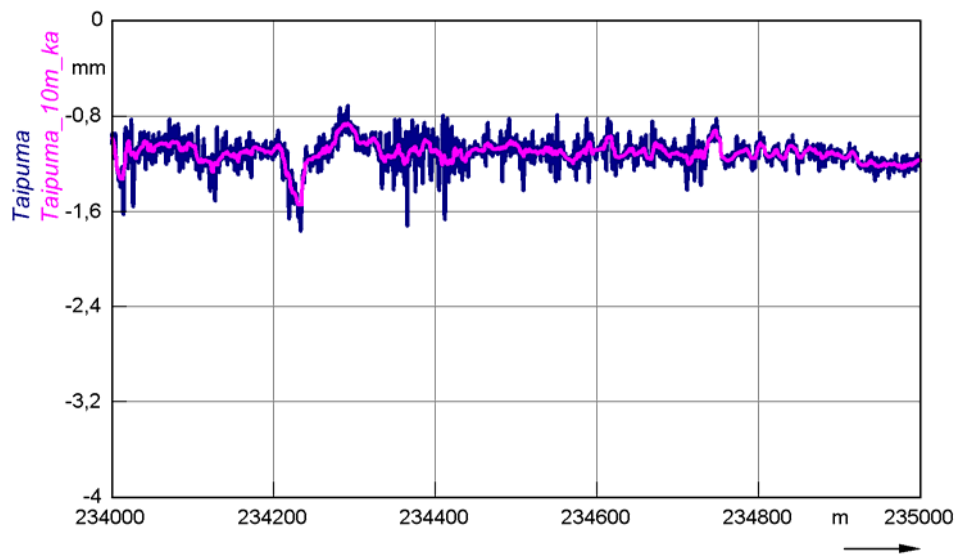
Kiskojen liitostavan kunnan merkitys korostuu sidekisko jatkokseissa, joiden taivutusvastus on hitsijatkokseen verrattuna selvästi pienempi. Kun jatkos on hyväkuntoinen, sepeli uudehkoa ja tuenta kunnossa, taipuman lukuarvo jatkoksessa ei poikkea olennaisesti jatkoksettomaan kohtaan verrattuna. Kun jatkoksen kiinnitys on löysä ja sepeli huonossa kunnossa, aiheutuu jatkokseen jopa yli 10 mm keskimääräistä suurempi taipuma (Kuva 5.1). Esimerkkikuva on rataosalta Turku–Uusikaupunki, jossa jäykkyysmittausta on tehty noin 3 kilometrin matkalta. Päälysrakenne on rataosalla huonossa kunnossa ja kisko jatkoksen kohdalla pölkkyt roikkuvat osin ilmassa. Sidekisko jatkoksia esiintyy 50 metrin välein ja ne näkyvät useiden millimetrien suuruusina piikkeinä palautuvan painuman kuvaajassa. Kuitenkaan aivan kaikki jatkokset eivät kuvasta erotu, joten tuentatilan tärkeys korostuu sidekisko jatkoksen kohdalla. Kuvaajassa esiintyvä negatiivinen taipuma on yleisesti ottaen mittausvirhe, mutta useimmiten se tarkoittaa sellaista kohtaa radassa, jossa taipumasuppilo on laajempi kuin mittauksessa käytettävä pyöräväli 3 metriä (ks. luku 2.3.1). Tällaisia tilanteita esiintyy lähinnä sidekisko jatkokseissa tai muissa sellaisissa kohdissa rataa, joissa kiskot selvästi

roikkuvat ilmassa usean pölkyn matkalta. Näin kuorman vaikutus voi ulottua laajemmalle alueelle kuin 3 metriä suuntaansa kuorman keskipisteestä.



Kuva 5.1. Sidekiskojatkosten vaikutus palautuvaan painumaan Turku–Uusikaupunki-rataosalla.

Suurin vaikutus radan jäykkyyteen kiskojen tasolla ei siis tulekaan itse kiskoista vaan niiden jatkoksista. Muuttamalla sidekiskoraiteet jatkuvakiskoraiteeksi päästään eroon merkittävästä päällysrakennetta ja kalustoa kuormittavasta tekijästä. Kun edellä kuvattua sidekiskoraiteelta mitattua palautuvan painuman kuvaajaa verrataan hyväkuntoiseen jatkuvakiskoraiteeseen välillä Kaitjärvi–Taavetti, jatkosten merkitys tuentatilan heikentäjänä konkretisoituu (Kuva 5.2). Hyväkuntoisella radalla jäykkyyssvaihtelu on kilometrin matkalla vain alle 1 mm huipusta huippuun. Keskimääräistä jäykkyyssvaihtelua ei voi erilaisten päällysrakenteiden, alusrakenteiden ja pohjamaiden takia verrata toisiinsa, mutta vaihtelu on vertailukelpoista. Kuvan (Kuva 5.2) mittakaava on nelinkertainen kuvaan (Kuva 5.1) verrattuna.



Kuva 5.2. Esimerkki jatkuvakiskoraiteen palautuvasta painumasta Kaitjärvi-Taavetti-liikennepaikkavälillä.

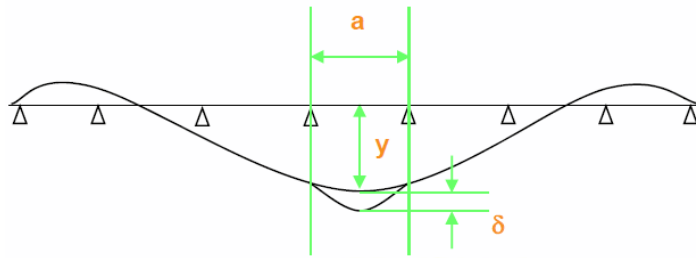
5.2 Välilevy

Joustava välilevy auttaa kiskoa jakamaan ratapölkkyille tulevia kuormituksia useammalle pölkylle ja samalla välilevy vaimentaa korkeita taajuuksia. Välilevyjen käytöllä pyritään pidentämään erityisesti betoniratapölkkyjen käyttöikää, mutta myös pienentämään tärinä- ja meluhaittoja. Jotta toivottu vaikutus syntyy, täytyy välilevyn olla riittävän joustava, mikä on taas omiaan lisäämään palautuvaa painumaa. Sekaliikennoradoilla välilevyn täytyy olla riittävän pehmeä, jotta se lisää matkustusmukavuutta, mutta toisaalta riittävän jäykkä, jotta se kantaa raskaiden tavarajunien kuormitukset (Steidl 2010). Yleisesti ottaen alhainen dynaaminen jäykkyys on tavoiteltavaa, koska sillä saavutetaan

- parempi matkustajamukavuus
- tärinän ja iskukuormien vaimennus
- pienempi liikkuvan kaluston rasitus
- toisen kertaluokan taipuman (kuva 5.3) pieneminen
- pienempi sepeliin kohdistuva kuormitus.

Palautuvan painuman y ja toisen kertaluokan taipuman δ eron (Kuva 5.3) ei tulisi olla enempää kuin 3–4 %, tai se voi johtaa

- korrugaation lisääntymiseen
- runkomelun lisääntymiseen
- melun lisääntymiseen.



Kuva 5.3. Toisen kertaluvun taipuman määritelmä.

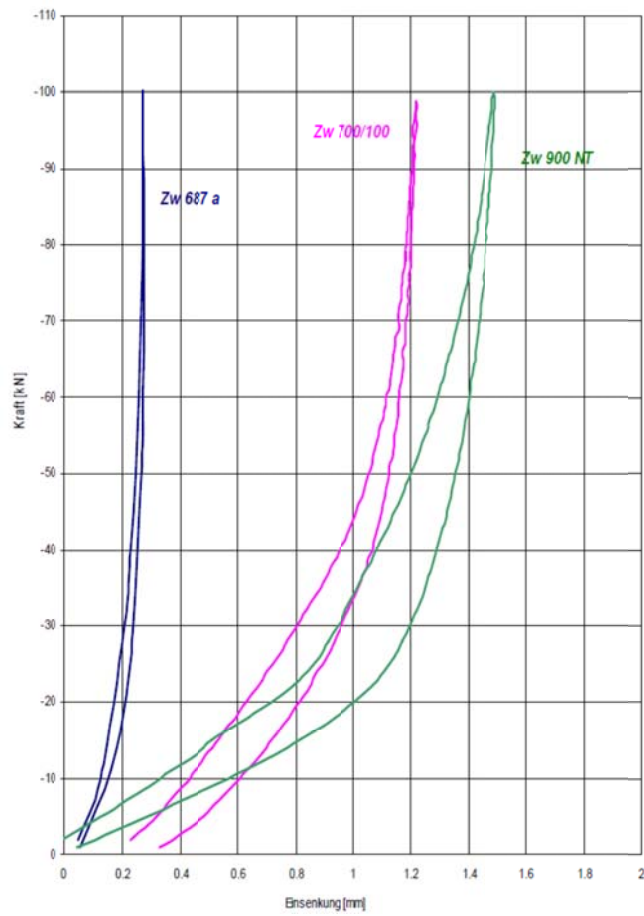
Välilevyn jousto riippuu itse välilevymateriaalista, sen paksuudesta ja tietenkin myös kuormituksesta. Välilevyyn kohdistuvan kuormituksen suuruuteen vaikuttavat akselipaino ja kiskon taivutusvastus ja myös itse radan jäykkyys, kuten edellisessä luvussa kerrottiin. Kuorman jakautumisesta on usein esitetty oletus, että puolet akselipainosta välittyisi kuorman alla olevalle ratapölkylle ja 20–25 % seuraaville pölkylle (Rato 3). Tällä oletuksella jäykkyyksmittauksissa välilevyn kuormaksi tulisi puolet pyöräpainosta eli noin 35 kN. Tällä kuormalla välilevyn jousto voisi olla erityyppisillä välilevyillä suuruusluokassa 0,2–1,2 mm (Kuva 5.4) (Steidl 2010).

Suomessa yleisesti käytettyä välilevyä Zw 900 NT on testattu myös TTY:llä standardin SFS-EN 13146-9 mukaisesti. Staattisissa kuormituskokeissa päädyttiin samankaltaiseen joustoon, ehkä jopa hieman suurempaankin, kuin lähteessä Steidl 2010 (Kuva 5.5). Yleisesti välilevyn jäykkyys ilmoitetaan kuormitusväliltä 20–95 kN. Jäykkyyden määrittämistä ei aloiteta voimien nollassa, sillä esimerkiksi Skl 14 kiinnitys puristaa kiskoa välilevyä vasten noin 20 kN voimalla. Ennen junan aiheuttamaa kuormitusta välilevy on jo kokoonpuristunut noin yhden millimetrin.

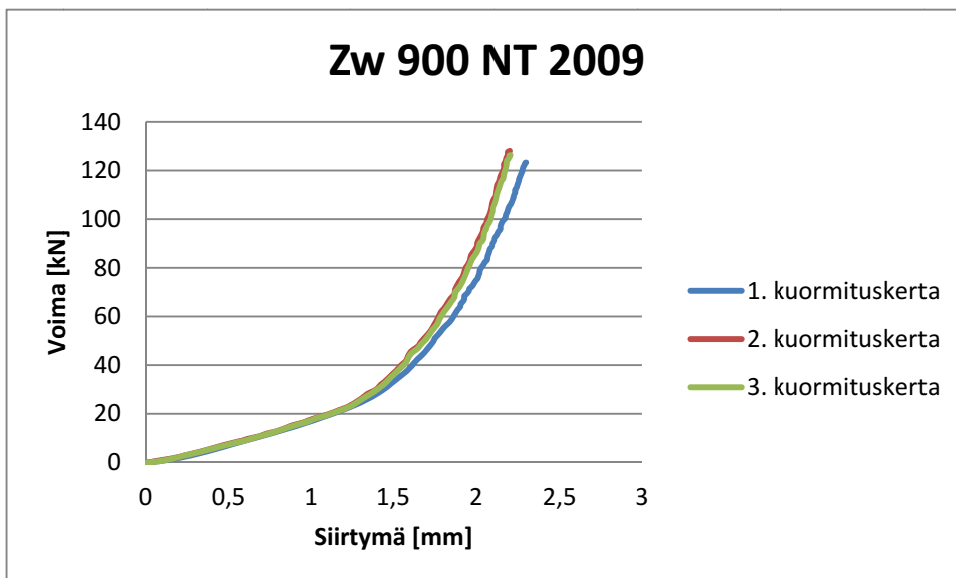
Testattujen Zw 900 NT välilevyjen jäykkyys kuormitusvälillä 20–95 kN oli seuraavanlainen:

- 82 kN/mm (2009)
- 82 kN/mm (2009-2)
- 96 kN/mm (2003)
- 81 kN/mm (2006)

Edellä kuvatut jäykkyydet johtavat 35 kN kuormalla noin 0,4 mm joustoon.



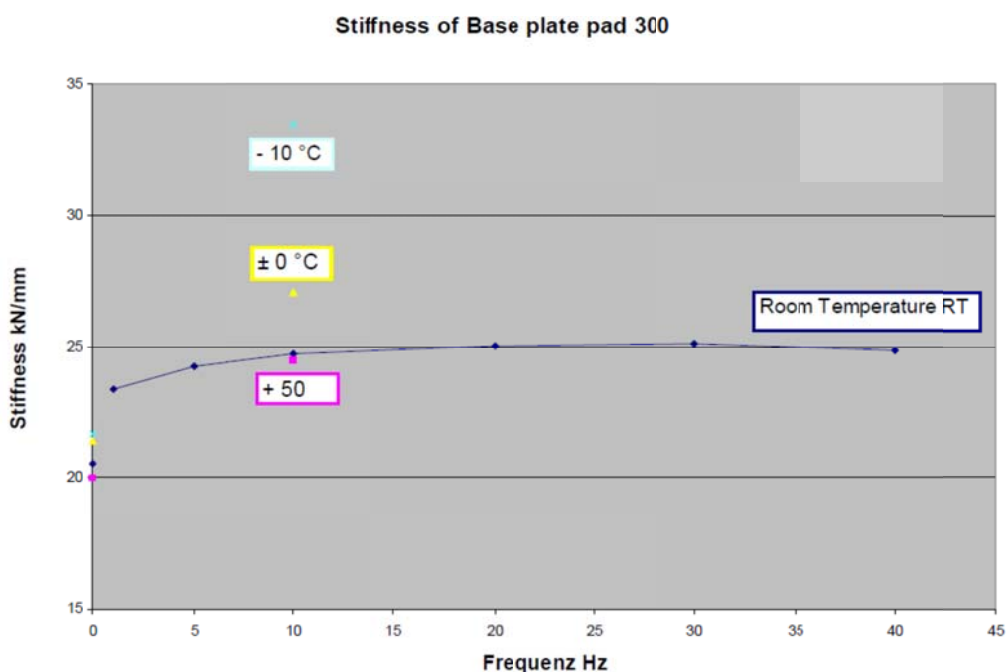
Kuva 5.4. Välilevyn jousto lähteen (Steidl, 2010) mukaan.



Kuva 5.5. Vuodelta 2009 olevan käyttämättömän Zw 900 NT välilevyn voima-siirtymäkuvaaja.

Välilevyn ominaisuuksia on mitattu kentällä niukasti, mutta radan jäykkyyksmittausten yhteydessä Lielähti–Ylöjärvi välillä tätäkin asiaa on tarkasteltu Zw 900:lla. Mittaus tehtiin siirtymäantureilla, jotka kiinnitettiin kiskoon magneeteilla. Siirtymäanturit mittasivat kiskon pystysuuntaista liikettä suhteessa pölkkyyn. Mittauksissa saatiin välilevyn joustoksi IC-junan kuormittamana noin 0,4 mm. Jäykkyyksmittauksissa käytettävän TKA7:n aiheuttama välilevyn jousto oli vain noin 0,2 mm. Mittaukset tehtiin pienessä pakkasessa ja IC-junan nopeus oli 160 km/h eli kuormitustaaajuus oli useita kertoja sekunnissa. TKA:n ajonopeus oli vain 10 km/h, joten sen kuormitusnopeus oli lähellä staattista kuormitusta.

Toteutuvan jouston suuruuteen vaikuttavat siis myös kuormitusnopeus ja lämpötila. Varsinkin kylmien lämpötilojen on havaittu kasvattavan välilevyn jäykkyyttä merkittävästi (Kuva 5.6) (Steidl, 2010). Tämän lisäksi kuormitusnopeuden kasvu lisää jäykkyyttä enemmän nimenomaan kylmissä olosuhteissa.



Kuva 5.6. Kuormitusnopeuden ja lämpötilan vaikutus välilevyn jäykkyyteen (Steidl 2010).

TTY:n kuormituskokeissa tehtiin myös dynaamisia testejä, joissa välilevyjä kuormitettiin huoneenlämpötilassa standardin EN 13481-2 mukaisesti. Näissä kokeissa kuormitustaaajuus oli 3 Hz. Mitatut välilevyjen dynaamiset jäykkyydet olivat kuormitustasolla 20–95 kN:

- Zw 900 NT (2003): 142 kN/mm
- Zw 900 NT (2006): 122 kN/mm
- Zw 900 NT (2009): 130 kN/mm
- Korkkikumivälilevy: 450 kN/mm

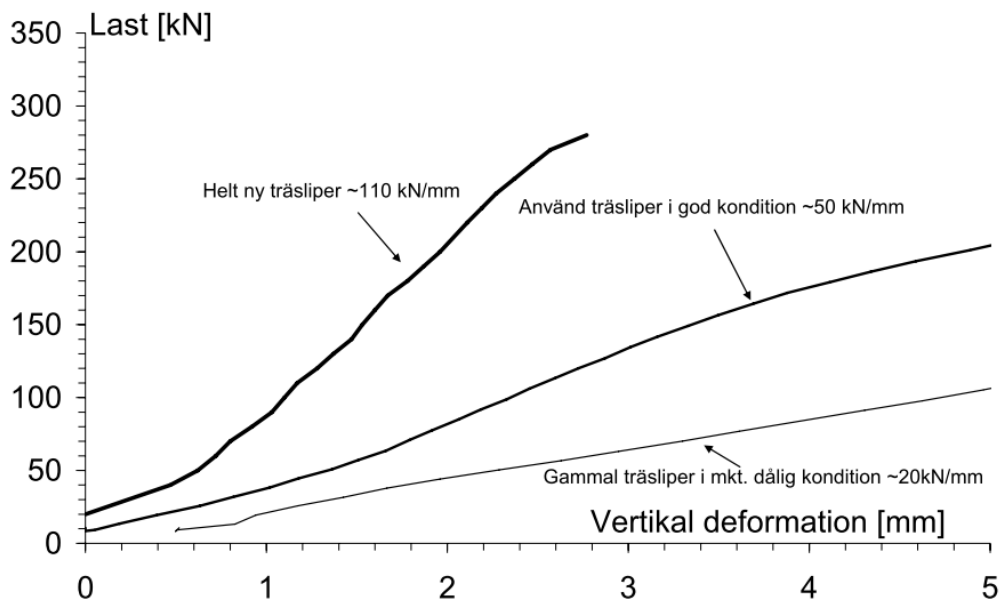
Dynaamisten jäykkyyksien perusteella laskettu Zw 900 NT välilevyn jousto olisi TKA:n 35 kN kuormalla noin 0,25–0,29 mm ja IC-junan Veturin tuottamalla 52 kN kuormalla noin 0,36–0,43 mm. Näin määritetty jousto vastaa kohtalaisen hyvin Lielähti–Ylöjärvi välillä tehtyjä kenttähavaintoja. Korkkikumivälilevyn jousto on hyvin marginaalinen, jäykkyyksmittauksissa käytettävällä TKA:n kuormalla korkkikumin jousto on alle 0,1 mm.

Kokonaisuuden kannalta välilevyn jousto on merkittävässä roolissa talvella, kun muu ratarakenteen jousto on routaantumisen takia pienentynyt. Talvella jopa puolet palautuvasta painumasta voi olla peräisin välilevystä. Kesällä hyväkuntoisen ratarakenteen palautuva painuma kiskosta mitaten on noin 1 mm tai hieman enemmän ja tällöin välilevyn osuus joustosta on noin yksi kolmasosa. Huonokuntoisen tukikerroksen tai pehmeän pohjamaan tapauksessa välilevyn osuus kokonaisjoustosta on hyvin pieni eikä välilevyn ominaisuuksilla ole palautuvan painuman näkökulmasta juurikaan merkitystä.

Optimaalinen välilevy olisi sellainen, että sen jäykkyys pienenesi lämpötilan laskiessa. Lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle ratarakenne routaantuu ja maarakenteista tuleva jousto pienenee nopeasti. Matkustajamukavuuden, melun ja myös radan eri komponenttien kannalta olisi hyvä, jos joku osa radasta säilyttäisi kimmoisuutensa myös silloin, kun joustoa ei muuten ole tarjolla. Tällaisen materiaalin löytäminen voi olla haastavaa, muttei täysin mahdotonta.

5.3 Ratapölkky

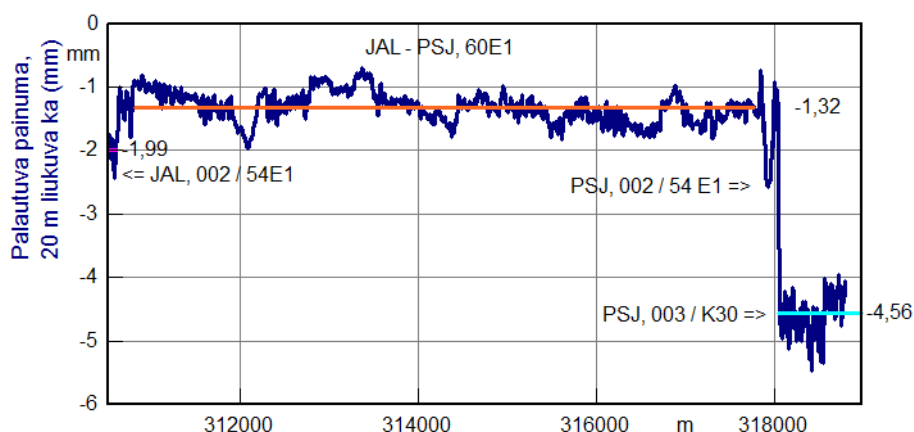
Ratapölkyn ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi radan jäykkyyteen. Suurin ero syntyy itse pölkymateriaalien kuten betonin ja puun kokoonpuristuvuudessa. Betonin kimmomoduuli on betonilaadusta ja betonin iästä riippuen 25–35 GPa. Betonin kimmoinen kokoonpuristuma on pölkylle tulevan pintapaineen avulla karkeasti arvioituna vain mikrometrien suuruusluokassa. Sen sijaan etenkin käytettyjen puupölkkyjen on havaittu kokoonpuristuvan millimetritasolla. Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan (Bolmsvik 2011) ero uuden ja vanhan huonokuntoisen puupölkyn kokoonpuristumassa voi olla jopa yli viisinkertainen (Kuva 5.7). Puupölkyn kokoonpuristuma kasvaa kuormitusmäärän kasvaessa vaikka pölkky olisi muuten hyväkuntoinen.



Kuva 5.7. Puupölkyn kokoonpuristuma ruotsalaisen lähteen mukaan. (Bolmsvik 2011)

Päällysrakenteen tyyppi ja kunto vaikuttavat radan jäykkyyksmittaustulostenkin mukaan merkittävästi palautuvan painuman arvoon. Esimerkiksi Ruotsissa tehdyn mittauksen mukaan vanhojen puupölkkyjen vaihtaminen uusiin tehtaalla esiheikennettyihin betonipölkkyihin lisäsi radan jäykkyyttä 61 % ja uudet puupölkkyt kasvattivat jäykkyyden peräti kaksinkertaiseksi (Bolmsvik 2011). Puupölkky siis pehmenee kohti käyttökänsä loppua. Betonin kokoonpuristuvuusominaisuuksien ei pitäisi ratkaisevasti muuttua käyttöiän aikana, pikemminkin betoni vain lujittuu entisestään.

Vastaavia havaintoja on saatu myös Suomessa jatkuvalla mittausmenetelmällä tehdyissä mittauksissa, sillä keskimääräinen palautuva painuma kasvaa merkittävästi siirryttäessä pääraiteelta sivuraiteelle. Suurin ero raiteiden kesken on tähän mennessä tehdyissä mittauksissa havaittu Peräseinäjoen liikennepaikalla (Kuva 5.8), jossa sivuraiteella kiskotyyppi on K30 ja pölkkyt mitä ilmeisimmin heikossa kunnossa. K30-kiskolla varustetun puupölkkyraiteen keskimääräinen palautuva painuma oli mittauksissa 4,5 mm, kun vastaava arvo oli 54E1 kiskolla varustetulla raiteella Jalasjärven liikennepaikalla noin 2,0 mm ja pääraiteella (60E1) 1,3 mm näiden liikennepaikkojen välillä. Ainoastaan pääraiteella on käytössä betonipölkkyt, ratapihaosuudet ovat puupölkkyraiteita. Oletettavasti suurin ero 60E1 ja 54E1 raiteiden palautuvassa painumassa on peräisin juurikin pölkkyistä, sillä muiden jäykkyyteen vaikuttavien asioiden voidaan olettaa olevan suhteessa selvästi pienempiä. Sen sijaan K30 raiteen rakenne oletettavasti poikkeaa merkittävästi edellisistä ja selittää osaltaan erittäin suurta palautuvan painuman tasoa.



Kuva 5.8. Päällysrakennetyypin vaikutus keskimääräiseen palautuvaan painumaan liikennepaikkavälillä Jalasjärvi–Peräseinäjoki.

5.4 Pohjain

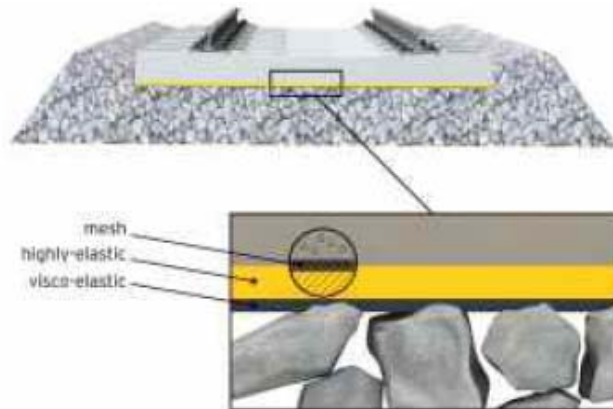
Maailmalla on pyritty kehittämään rakenneratkaisuja radan kokonaisjäykkyyden muokkaamiseen. Yksi tällainen ratkaisu on ratapölkyn alapintaan asennettava joustava levy eli pohjain (under sleeper pad, USP, sleeper soffit pad). Pohjaimella pyritään tilanteesta riippuen muun muassa alentamaan rataa kohdistuvia rasituksia, pienentämään radassa esiintyviä jäykkyyssvaihteluja, alentamaan kalustoon kohdistuvaa värähtelyä ja alentamaan syntyvää melua. Pohjainten pääasiallisena tarkoituksena onkin vähentää radan kunnossapitokustannuksia. (Schneider et al. 2011)

Pohjaimista on käyttökokemuksia jo noin 20 vuoden ajalta, mutta laajempi käyttö on yleistynyt vasta viimeisen 5–10 vuoden aikana. Keski-Euroopassa, varsinkin Itävallassa, Saksassa ja Ranskassa pohjainten käyttö on lisääntynyt merkittävästi. Esimerkiksi Itävallassa pääradoilla vuodesta 2005 lähtien pohjain on ollut vakioratkaisu vaihteissa sekä luokan A radoilla (kaarresäteet yli 250 m ja päivittäinen liikennekuorma yli 300000 tonnia). Jo vuonna 2009 Itävallassa olikin yli 300 km pohjaimilla varustettua raidetta ja yli 250 pohjaimilla varustettua vaihdetta. Myös Suomessa vähäisiä määriä pohjaimia on asennettu koekäyttöön. Pohjainten hyvistä käyttökokemuksista ja kasvavasta käytöstä huolimatta maailmalla ei ole täyttä varmuutta siitä miten pohjain vaikuttaa pitkällä aikavälillä radan toiminnallisuuteen. (Peltokangas et al. 2013; Schneider et al. 2011)

Pohjaimille ei ole olemassa käytössä olevaa yleistä standardia. Saksassa on pohjaimiin liittyen julkaistu kaksi standardia, joista toinen käsittelee pohjaimien materiaaliominaisuuksia ja toinen pohjaimen ja pölkyn välisen liitoksen kestävyyttä. Yleisen ohjeistuksen puuttumisen johdosta vuonna UIC:n pohjaimia käsittelevän projektin yhtenä osa-alueena on pohjainmateriaalien standardisoiminen ja sopivien testausapojen määrittäminen. Pohjainratapölkkyjen standardointi käynnistyi 2008. Standardi sisältää yleiset vaatimukset, mekaanisten ominaisuuksien kokeellisen määrittämisen, ympäristövaikutusten kokeellisen määrittämisen, laadunvalvonnan ja merkinnät. Standardin ensimmäinen esiluonnos valmistui 2011. Tähän mennessä ongelmana on ollut se, että pohjainmateriaalien eri testausmenetelmät antavat esimerkiksi pohjaimen jäykkyydelle eriäviä tuloksia. Puutteellisen standardoinnin lisäksi maailmalla ei ole annettu ohjeistusta pohjaimien ja pölkkyissä käytettävien välilevyjen jäykkyyksien suhteille. Erinäisissä tutkimuksissa on havaittu, että pohjaimen jäykkyydellä on merkitystä myös optimaaliseen välilevyn jäykkyyteen. (Schneider et al. 2011; UIC 2009; Viitala 2011)

5.4.1 Ominaisuudet

Pohjaimen valmistusmateriaalina voi olla esimerkiksi polyuretaani, luonnonkumi tai etyyli-vinyylasetaatti (EVA). Pohjain on paksuudeltaan tyypillisesti 10–20 mm (Suomessa koekäytössä olleet pohjaimet 7 mm paksuja) ja siinä on kiinnitystavasta riippuen usein kahdesta kolmeen kerrosta. Kerroksista ulomman on tarkoitus suojata tukikerroksen kiviaineksen hankaavalta kulutukselta, keskimäinen kerros antaa pohjaimelle halutut jousto-ominaisuudet ja sisimmäinen kerros kiinnittää pohjaimen pölkkyyn. Kovemmat pohjaimet voidaan kuitenkin valmistaa ilman kulutukselta suojaavaa geotekstiilikerrosta. Kuva 5.9 esittää periaatekuvan pohjaimesta ja pohjaimen rakennekerroksista. (Getzner 2013b; Peltokangas et al. 2013; Schneider et al. 2011)



Kuva 5.9. Periaatekuva pohjaimen käytöstä ja pohjaimen rakennekerroksista. (Loy 2012)

Pohjaimen jäykkyyden kuvaamiseen käytetään yleisesti alustalukua (bending modulus), joka yksinkertaistettuna kuvaa sitä kuinka suuren paineen yhden millimetrin painuma saa aikaan. Tyypillisesti yksikkönä käytetään N/mm^3 , joskin oikeampi muoto olisi $\text{N/mm}^2/\text{mm}$. (Loy 2009)

Pohjainten jäykkyydelle ei löydy kirjallisuudesta absoluuttisia raja-arvoja, mutta suuntaa-antavia luokituksia on esitetty. Esimerkiksi UIC:n (Auer et al. 2013) staattiselle jäykkyydelle, C_{stat} , antama luokitus on seuraava:

- Erittäin pehmeä: $C_{\text{stat}} \leq 0,10 \text{ N/mm}^3$
- Pehmeä: $0,10 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{stat}} \leq 0,15 \text{ N/mm}^3$
- Normaali: $0,15 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{stat}} \leq 0,25 \text{ N/mm}^3$
- Jäykkä: $0,25 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{stat}} \leq 0,35 \text{ N/mm}^3$

On kuitenkin syytä ottaa huomioon, että staattisen ja dynaamisen jäykkyyden suhde vaihtelee käytetystä valmistusmateriaalista riippuen. Tästä johtuen pelkästään staattisen jäykkyyden perusteella ei voida täysin arvioida pohjaimen, ja tätä kautta radan, dynaamista käyttäytymistä. (Auer et al. 2013)

Pohjainten jäykkyyden mittaamiselle ei ole nykyisellään olemassa kansainvälistä standardia, mutta ainakin Saksassa on kehitetty pienimittakaavainen, Deutsche Bahnin teknisten toimitusehtojen BN 918145-1 mukaan toteutettava väsytyksojärjestely. Lisäksi Ranskassa täyden mittakaavan koelaitteistoa (VIBROGIR) on sovellettu pohjaintutkimuksessa. UIC:n selvityksessä (UIC 2009) kolmen pohjaimen jäykkyys on määritetty sekä uutena että miljoonien kuormitus syklien jälkeen molemmilla koejärjestelyillä. Kokeissa jäykkyyttä on tarkasteltu sekä staattisena että dynaamisena. Vertailtaessa koetuloksia uusille pohjaimille saadut jäykkyysarvot menetelmien välillä olivat samansuuntaisia. Menetelmät eivät kuitenkaan ole täysin vertailukelpoisia, sillä VIBROGIRin havaittiin kuluttavan pohjainta enemmän kuormituksen aikana. (Pelto-kangas et al. 2013)

Jäykkyyden mittaamisen lisäksi Saksassa on toinen standardi, joka käsittelee testausmenetelmiä, joilla voidaan varmistaa pohjaimen ja pölkyn välisen liitoksen riittävä tartunta (Schneider et al. 2011). Standardin mukaan pohjaimen irtivetolujuus tulee olla vähintään $0,50 \text{ N/mm}^2$ (Loy 2008).

Pohjaimien käyttöikä on pyritty suunnittelemaan yhtä pitkäksi kuin ratapölkkyillä. On myös arvioitu, että muidenkin raiteen komponenttien käyttöikä pitenee pohjaimia käytettäessä. Saksassa on tutkittu Münchenin keskustassa sijaitsevan rautatien alta 17 vuotta asennuksen jälkeen poistettua Sylomer-materiaalia. Materiaalin ominaisuudet ovat verrattavissa uuden materiaalin ominaisuuksiin (Laitinen 2010.). Kuva 5.10 esittää Getznerin Sylomerista valmistaman pohjaimen 190 miljoonan bruttotonnin jälkeen. Kuvasta voidaan havaita pölkyn tukeutuneen pääasiassa pölkyn pään alueelta.



Kuva 5.10. Radassa ollut pohjaimella varustettu pölkky 190 miljoonan bruttotonnin jälkeen. (Loy 2008)

Lämpötilan lasku vaikuttaa pohjainmateriaalin jäykkyyteen. Jäykkyyden muutoksen suuruus on materiaaliriippuvaista. Esimerkiksi pohjainvalmistaja Getznerin mukaan Sylomerista valmistetun pohjaimen jäykkyys kasvaa noin 25 % lämpötilan laskiessa huoneen lämmöstä (+20 °C) noin -10 °C:een. Vastaavasti Sylodynista valmistetun pohjaimen jäykkyys kasvaa vain noin 5 % vastaavalla lämpötilanmuutoksella. Näin ollen varsinkin Sylomerista valmistettu pohjain menettää osan hyödyistään pakkasella, joskin menetetyt hyödyt vaikuttavat lähinnä tärinän vaimennuksen yhteydessä. Sylomerista valmistettu pohjain on huokosrakenteeltaan avoin, joten se imee vettä itseensä. Getznerin mukaan jäänyt vesi ei kuitenkaan vaikuta pohjaimen jäykkyyteen, sillä jää rikkoutuu pohjainta kuormitettaessa, jolloin pohjain alkaa toimia normaalisti. Lisäksi valmistajan ilmoituksen mukaan jäädytys-sulatussyklit eivät vahingoita pohjaimen materiaalia. Sylomerista poiketen Sylodynista valmistettu pohjain sisältää leikkauspintoja lukuun ottamatta vain umpinaisia huokosia, jolloin vesi ei pääse imeytymään pohjainmateriaaliin. Sylodynista valmistettu pohjain on kuitenkin noin 2–3 kertaa kalliimpi verrattuna halvimmasta materiaalista valmistettuun pohjaimen. Halvimmasta materiaalista valmistetun pohjaimen hinta on noin 25–30 €/ratapölkky. (Getzner 2013b)

5.4.2 Käytön tavoitteet

UIC:n tekemän USP raportin (UIC 2009) mukaan useissa tutkimukseen osallistuvissa maissa käytetään pohjaimia radan toiminnan parantamiseksi. Seuraavissa maissa on onnistuneesti käytetty pohjaimia: Ranska, Sveitsi, Norja, Tanska, Hollanti, Espanja, Unkari, Saksa ja Itävalta. Tutkimuksen perusteella seuraavat pohjaimilla saavutettavat hyödyt nousivat merkittävimiksi:

- kiskon (long pitch) korrugaation väheneminen pienisäteisissä kaarteissa
- tärinän ja runkomelun väheneminen
- radan kunnossapitotarpeen väheneminen, tukemisvälin pidentyminen
- mahdollisuus tukikerroksen ohentamiseen ainakin paikallisesti
- kiskoon ja pölkkyyn kohdistuvan kuormituksen väheneminen

- radan geometrian paraneminen
- raiteen stabiliteetin paraneminen
- radan elinkaarikustannusten väheneminen, varsinkin raskaasti kuormitetuilla rataosuuksilla.

Käytettävän pohjaimen jäykkyys tulee valita tilannekohtaisesti riippuen siitä, mitä hyötyä pohjaimen käytöllä tavoitellaan. Esimerkiksi pehmeä pohjain soveltuu lähinnä runkomelun ja tärinän vaimennukseen, kun taas jäykkyydeltään normaalit ja jäykät pohjaimet parantavat radan muita ominaisuuksia. Taulukko 5.2 esittää karkeasti jäykkyydeltään erilaisten pohjaimien soveltuvuuden käyttötarkoituksen mukaan.

Taulukko 5.2. Pohjaimen soveltuvuus tavoiteltavaan hyötyyn pohjaimen jäykkyyden mukaan (Auer et al. 2013).

Pohjaimella tavoiteltava hyöty	Pohjaimen jäykkyys		
	Pehmeä	Normaali	Jäykkä
Raiteen geometrian pysyvyyden parantaminen			
Radan jäykkyyserojen tasoittaminen			
Tukikerrospaksuuden ohentaminen			
Kiskojen pitkäaaltoisen korrugaation vähentäminen			
Runkomelun ja tärinän alentaminen			

5.4.3 Asentaminen

Tavallisesti pohjaimet asennetaan pölkköjen valmistusvaiheessa lukuisin eri tavoin, mutta ne voidaan asentaa myös jälkikäteen jo kovettuneisiin betonipölkköihin. Valmiin pöllyn alapinta voidaan päällystää joko ruiskuttamalla tai maalaamalla, jolloin saadaan aikaan pohjain (Kuva 5.11). Kovettuneeseen pölkköön on mahdollista kiinnittää valmis pohjain liimaamalla, mutta liimaaminen ei ole yhtä kustannustehokasta verrattuna muihin kiinnitystapoihin. Pohjaimia voidaan käyttää myös puupölkköjen yhteydessä, jolloin pohjain kiinnitetään pölkköön niittaamalla. (Getzner 2013b)

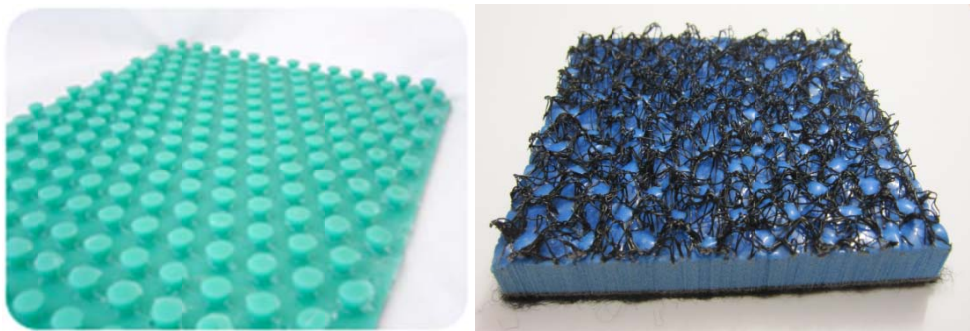


Kuva 5.11. Ruiskutettu polyuretaanivaaho pöllyn alapinnassa (Sateba 2013).

Betonipölkyn valmistusvaiheessa pohjaimet voidaan asentaa suoraan kosteaan betonipintaan. Kuva 5.12 esittää pohjainten asennusta pölkkyjen valuvaiheessa. Pohjaimet ovat pinnaltaan joko tasaisia tai pinnassa on integroituna kerros, joka muodostaa pohjaimen ja betonin välille pitävän liitoksen. Esimerkiksi Itävaltalainen Getzner ja Ranskalainen Fimor ovat patentoineet kiinnitysjärjestelmänsä (Kuva 5.13).



Kuva 5.12. Pohjainten asennusta pölkkyjen valun yhteydessä (Getzner 2013a).



Kuva 5.13. Vasemmalla Fimorin pohjaissa käyttämä kiinnitysjärjestelmä (Fimor 2013) ja oikealla Getznerin käyttämä pohjaimen kiinnitysjärjestelmä.

Pohjaimet asennetaan usein koko pölkyn pituudelle, mutta ne voidaan asentaa myös ainoastaan pölkyn päiden alueelle. Kuva 5.14 esittää ainoastaan pölkyn päiden alueelle asennettuja Fimorin valmistamia pohjaimia.



Kuva 5.14. Pohjaimet asennettuna vain pölkyn pään alueelle. (Fimor 2013)

Pohjaimilla varustetut pölkkyt voidaan asentaa rataan samoja asennusmenetelmiä käyttäen kuin tavalliset ratapölkkyt, joten pohjaimet eivät aiheuta lisäkustannuksia pölkkyjen asennusvaiheessa (Getzner 2013a).

5.4.4 Pohjainten vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen

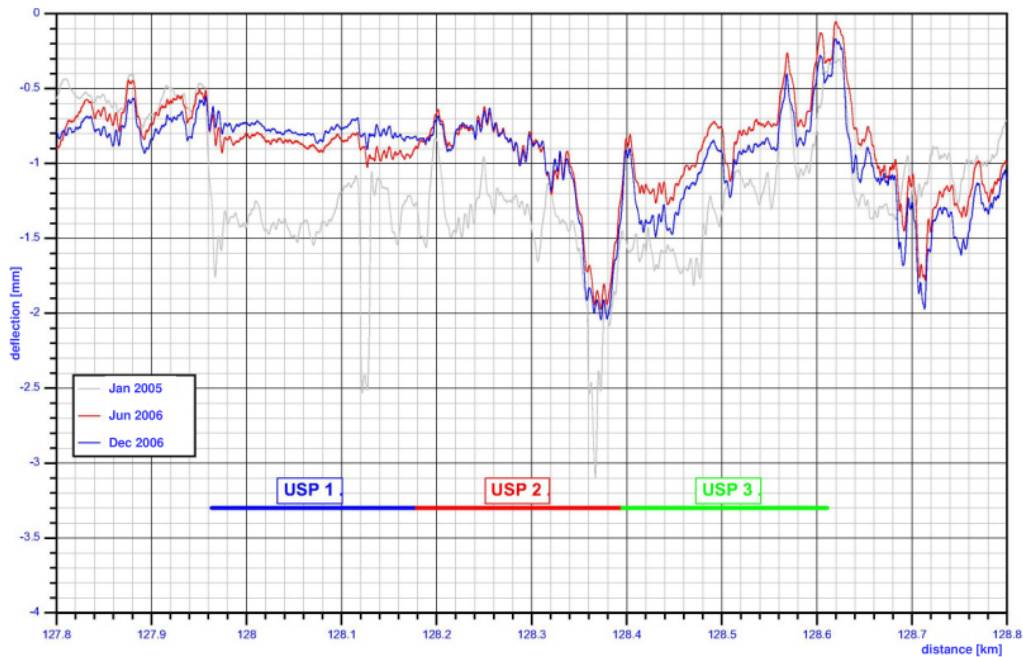
Radan pystysuuntainen jäykkyys vaikuttaa merkittävästi radan eri komponentteihin kohdistuviin rasituksiin ja radan geometrian pysyvyyteen. Erityisesti lyhyellä matkalla tapahtuvat jäykkyyksimuutokset aikaansaavat merkittävää dynaamisten voimien kasvua lisäten näin ratarakenteiden turmeltumista. Pohjaimet ovat tällä hetkellä yksi potentiaalisimmista tavoista vaikuttaa radan kokonaisjäykkyyteen.

Vuonna 2005 Sveitsissä rakennettiin koeosuus pohjainten vaikutusten selvittämiseksi. Koeosuudelle asennettiin ratapölkkyjä, joihin oli asennettu viiden eri valmistajan pohjaimia. Taulukko 5.3 esittää koeosuudelle asennettujen pohjainten valmistajat ja pohjainten staattisen jäykkyyden. Jokainen valmistaja ilmoitti pohjaintensa jäykkyydeksi $0,30 \text{ N/mm}^3$. Pohjainten jäykkyys testattiin laboratoriossa Bahn Norm D.B.918145-01 standardin mukaisesti. Saadut tulokset erosivat merkittävästi valmistajien ilmoittamista jäykkyyksisarvoista. Osa vaihtelusta johtui pohjainmateriaalien eri jäykkyyksistä, mutta todennäköisesti merkittävin syy eroihin oli standardin mukaisessa mittaustavassa. Jatkotutkimukset ovat osoittaneet, että käytetty mittaustapa ei sovellu jäykille pohjaimille. Tästä syystä pohjainten jäykkyyttä arvioitiin radalla suoritettujen mittausten perusteella, jotta saatiin parempi arvio pohjainten todellisesta jäykkyydestä. Kunkin valmistajan pohjaimilla varustetuista ratapölkkyistä rakennettiin 216 m pitkä testiosuus. Lisäksi radalle rakennettiin 283 m pitkä vertailuosuus, johon asennettavia ratapölkkyjä ei varustettu pohjaimilla. Koeosuudella akselipainona oli 22,5 tonnia, kiskoprofiilina 60E1 ja kiskonkiinnityksenä Skl1. Kiskonkiinnityksissä käytettyjen välilevyjen jäykkyys oli 600–800 kN/mm ja tukikerroksen paksuus pölkkyjen alla oli noin 400 mm. Koeosuudella junaliikenteen aikaansaama kuormitus oli noin 70000 bruttotonnia päivässä. (Perpinya 2012; Schneider et al. 2011; UIC 2009)

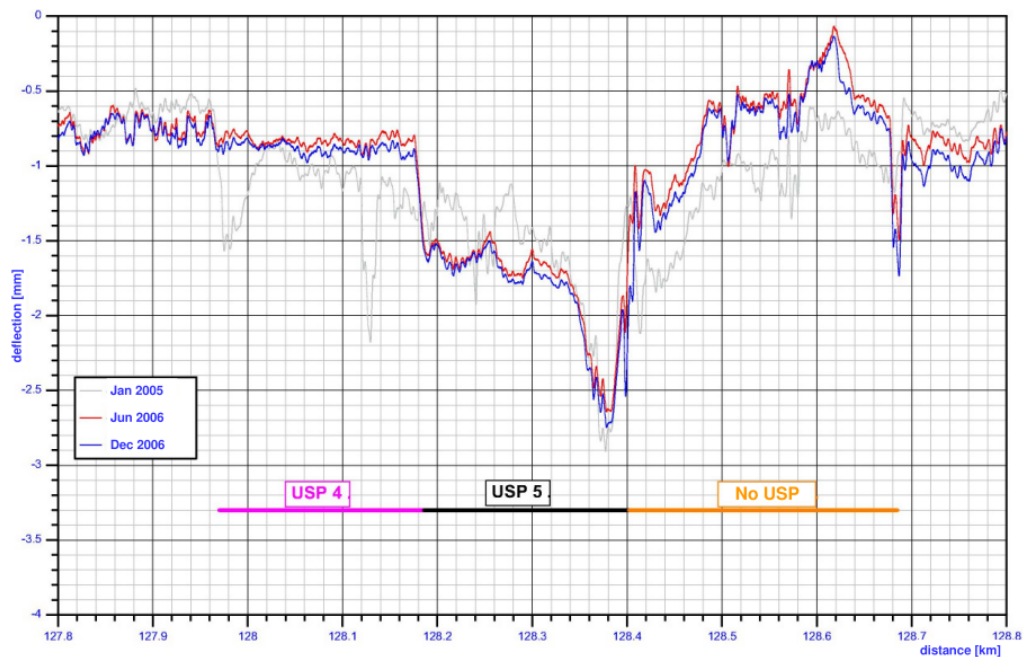
Taulukko 5.3. Sveitsiin vuonna 2005 rakennetulla koeosuudella käytetyt pohjaimet ja niiden jäykkyys. (Schneider et. al. 2011; UIC 2009)

Koeosuus	Malli	Valmistaja	Staattinen jäykkyys (N/mm ³)	
			Kenttäolosuhteissa (arvioitu)	Laboratoriossa (mitattu)
USP 1	SLB 3007G	Getzner	0,30	0,15
USP 2	M 01	Muller-RST	0,30	0,17
USP 3	S 01	Spreepolymer	0,35	0,38
USP 4	PRA	Sateba	0,30	0,14
USP 5	TR1-85M	Tiflex	0,25	0,08

Kuva 5.15 esittää kolmella eri pohjaintyyppillä varustetun koeosuuden (USP 1, USP2 ja USP 3) ja Kuva 5.16 esittää kahden eri pohjaintyyppillä varustetun koeosuuden (USP4 ja USP5) sekä pohjaimettoman vertailuosuuden osalta harmaalla viivalla kiskon taipuman ennen pohjainten asennusta ja rataosuuden parantamista. Punaisella viivalla on esitetty kiskon taipuma pohjainten asennuksen jälkeen ja sinisellä viivalla taipuma noin puolen vuoden jälkeen pohjainten asentamisesta. Mittauksessa käytettiin SBB:n mittausvaunua ja rataa kuormitettiin 20 tonnin akselikuormalla. Pohjaintyyppi USP5 oli melko pehmeä, mistä johtuu taipumien jyrkkä kasvu siirryttäessä pohjaintyyppin USP4 alueelta USP5 alueelle.



Kuva 5.15. UIC:n pohjainkohteen kiskon taipumamittaustuloksia pohjaintyypeillä USP1, USP2 ja USP3 varustetuilla osuuksilla (UIC 2009)



Kuva 5.16. UIC:n pohjainkoekohteen kiskon taipumamittaustuloksia pohjaintyypeillä USP4 ja USP5 varustetuilla osuuksilla sekä vertailuosuudella. (UIC 2009)

Keskiarvoina 10 metrin osuuksittain tarkasteltuna vertailuosuuden kiskon taipuma oli noin 0,70 mm ja pohjaintyyppien USP1-USP4 alueilla taipumat olivat keskimäärin 0,80–0,90 mm. Pehmeämmän pohjaintyyppin USP5 alueella taipumat olivat keskimäärin 1,70 mm. Pohjaintyyppien USP1-USP4 alueilla kiskon taipumat olivat pääsääntöisesti pienempiä verrattuna tilanteeseen ennen pohjainten asennusta. Kiskon pienemmät taipumat johtuvat kuitenkin todennäköisesti vuoden 2005 mittausten jälkeen rataosuudelle tehdystä perusparannuksesta. Taipumaerojen arviointia hankaloittaa myös se, että ennen perusparannusta raide oli varustettu puuratapölkyillä. Tästä johtuen on vaikeaa varmuudella arvioida pohjainten vaikutusta taipumien muutoksessa. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin esittää varovainen arvio siitä, että pohjainten käyttö on jonkin verran tasoittanut radan taipumakäyttäytymistä. (Schneider et al. 2011; UIC 2009)

Kenttätutkimuksissa on havaittu pohjaimilla varustetun raiteen geometrian säilyvän paremmin verrattuna pohjaimettomaan raiteeseen. Tämä johtaa suoraan kunnossapidon, erityisesti tuentatarpeen vähenemiseen. Esimerkiksi pohjainvalmistaja Getzner on arvioinut pohjainten parhaimmillaan lähes puolittavan tuentatarpeen erityisesti vasta rakennetuilla radoilla. Syynä geometrian parempaan pysyvyyteen on junan aikaansaaman pyöräkuorman jakaantuminen useammalle pölkylle samalla kun pohjain kasvattaa pölkyn ja tukikerroksen välistä kontaktipinta-alaa. Tämä johtaa pienempiin tukikerrokseen kohdistuviin rasituksiin vähentäen tukikerroksen kiviaineksen hienontumista ja tiivistymistä. Tukikerroksen rasitusten alentumista on käsitelty tarkemmin luvussa 5.4.5. (Schneider et al. 2011; Getzner 2013b)

5.4.5 Kuormituksen jakautuminen

Ratapenkereen jäykkyys vaikuttaa yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvan kuormituksen suuruuteen ja ratapölkyn alla olevan raidesepelin kuormitukseen. Raidesepelin kuormitus määräytyy suurelta osin raidesepelin ja ratapölkyn välisen kontaktipinta-alan mukaan. Kontaktipinta-alan kasvattamiseksi on kehitetty erilaisia rakenneratkaisuja, muun muassa ratapölkyn pohjaimet, joiden elastinen rakenne mukautuu betonia paremmin raidesepelin epätasaiseen pintaan. (Esveld 2001)

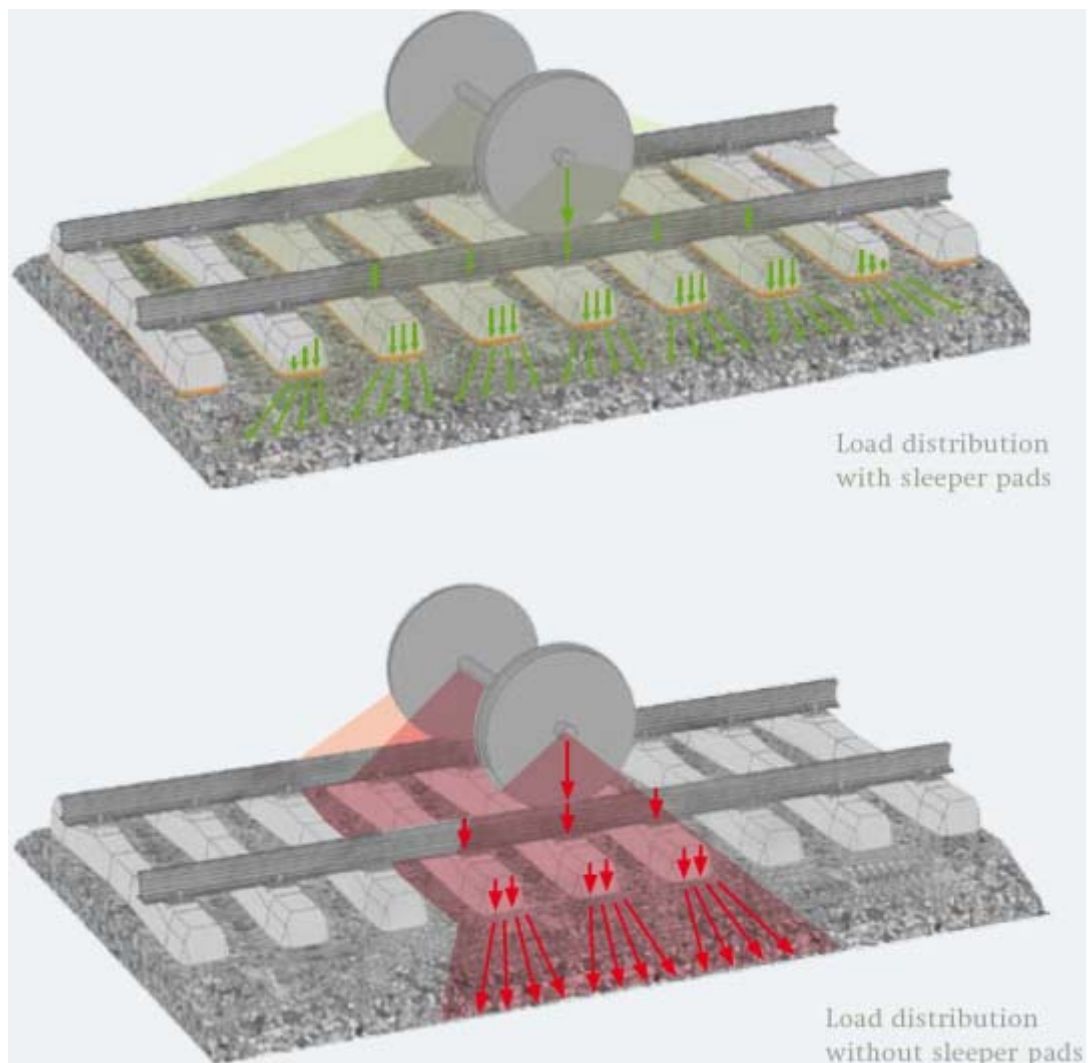
Riessbergerin mukaan betonirataratapölkyn pohjapinta-alasta ainoastaan noin 3–4 % on suorassa kontaktissa tukikerroksen kiviainekseen. Vastaava kontaktiala pohjainvalmistaja Getznerin mukaan on noin 5–8 %. Raidetta kuormitettaessa pieni kontaktiala johtaa kiviaineksen hienonemiseen ja epätasaiseen tiivistymiseen pienentäen näin tukikerroksen käyttöikää kasvattaen samalla raiteen muihin komponentteihin ja kalustoon kohdistuvia dynaamisia kuormia. Tukikerroksen hienontuminen ja epätasainen tiivistyminen voivat johtaa jopa tyhjien tilojen muodostumiseen ratapölkyn alle. Pölkyn ja tukikerroksen kontakti voidaan jaotella karkeasti neljään ryhmään. Pölkky voi olla kontaktissa tukikerrokseen koko pölkyn pituudelta, pölkky voi olla tukeutunut vain päistään (saattaa johtaa pölkyn värähtelyjen kasvuun), pölkky voi olla tukeutumaton päiden alueelta eli niin sanottu dancing sleeper, jolloin värähtely lisääntyy ja pölkyn keskiosan rasitukset kasvavat. Edellä mainittujen tuentatilanteiden lisäksi pölkky voi olla kokonaan tukeutumatta tukikerrokseen. Maailmalla on esitetty arvioita, että jopa 70 % betoniratapölkkyistä on heikosti tukeutuneita ja sisältävät tyhjiä tiloja pölkyn ja tukikerroksen välillä. Tyhjät tilat aiheuttavat monia ongelmia, kuten kasvattavat ratarakenteiden rasituksia ja kiihdyttävät tukikerroksen kiviaineksen hienontumista alentaen samalla radan kokonaisjäykkyyttä. On myös arvioitu, että kiskojen korrugaatiosta suurin osa johtuu pölkyn alapuolisten tyhjien tilojen ratapölkkyihin aikaansaamasta epäsuotuisasta värähtelystä. (Auer et al. 2013; Loy 2008; UIC 2009; Witt 2008)

Pohjaimien käytöllä pyritään kasvattamaan pölkyn ja tukikerroksen välistä kontaktipinta-alaa. Betonipölkkyä selkeästi pehmeämpi pohjain sallii tukikerroksen kiviaineksen painumisen pohjaimeen, jolloin pölkyn ja tukikerroksen kontaktipinta-ala kasvaa. Käytettäessä pohjainta, jonka jäykkyys on keskimääräinen $0,2 \text{ N/mm}^3$, arvioidaan kontaktipinta-alan olevan jopa 30–35 % pölkyn pohjan pinta-alasta. Pohjaimen jäykkyydellä on kuitenkin suuri vaikutus kontaktipinta-alan suuruuteen. Esimerkiksi Saksassa tehdyissä tutkimuksissa on arvioitu kontaktipinta-alan olevan pehmeillä pohjaimilla (jäykkyys 30 kN/mm eli 30 kN kuorma aikaansaa yhden millimetrin kokoonpuristuman pohjaimessa) noin 36 % pölkyn pohjapinta-alasta, kun taas jäykkillä pohjaimilla (70 kN/mm) kontaktipinta-alan arvioidaan olevan noin 18 % pölkyn pohjapinta-alasta. Saksassa on myös laskennallisesti arvioitu, että B70-pölkyn tukikerrokseen kohdistama keskimääräinen jännitys on $0,158 \text{ N/mm}^2$, kun taas jäykkyydeltään 70 kN/mm pohjaimella varustettu pölkky kohdistaa keskimäärin tukikerrokseen $0,136 \text{ N/mm}^2$ jännityksen ja jäykkyydeltään 50 kN/mm pohjain vastaavasti keskimäärin $0,130 \text{ N/mm}^2$ jännityksen. (Getzner 2013a; Müller-Boruttau & Kleinert 2001)

Kontaktipinta-alan kasvu vähentää merkittävästi kiviaineksen hienontumista pienentäen näin kunnossapitotarvetta samalla tukikerroksen käyttöikää kasvattaen. Lisäksi tutkimuksissa on havaittu pohjainten vähentäneen tukikerroksen epätasaisista tiivistymistä, jolloin tyhjiä tiloja ei juurikaan muodostu pölkyn ja tukikerroksen väliin. Osittain tästä johtuen myös esimerkiksi pölkkyyn kohdistuvat rasitukset arvioidaan pienentyvän. (Auer et al. 2013)

Tukikerroksen ja pölkyn kontaktipinta-alan kasvattamisen lisäksi pohjaimien kimmoisuus ja näin ollen radan raiteen kokonaisjäykkyuden aleneminen pidentää raiteen taipumismatkaa eli kasvattaa kiskojen pystysuuntaisen taipuman kaarevuussädettä junakuorman alla (Kuva 5.17). Pystykuorma jakaantuu useammille ratapölkkyille ja siksi pienentää tukikerrokseen kohdistuvaa suurinta puristusjännitystä. Tämän seurauksena, kun pohjaimien kimmoiset ominaisuudet valitaan oikein, tukikerros kuluu hitaammin kuin se kuluisi ilman pohjaimia. (Getzner 2013a)

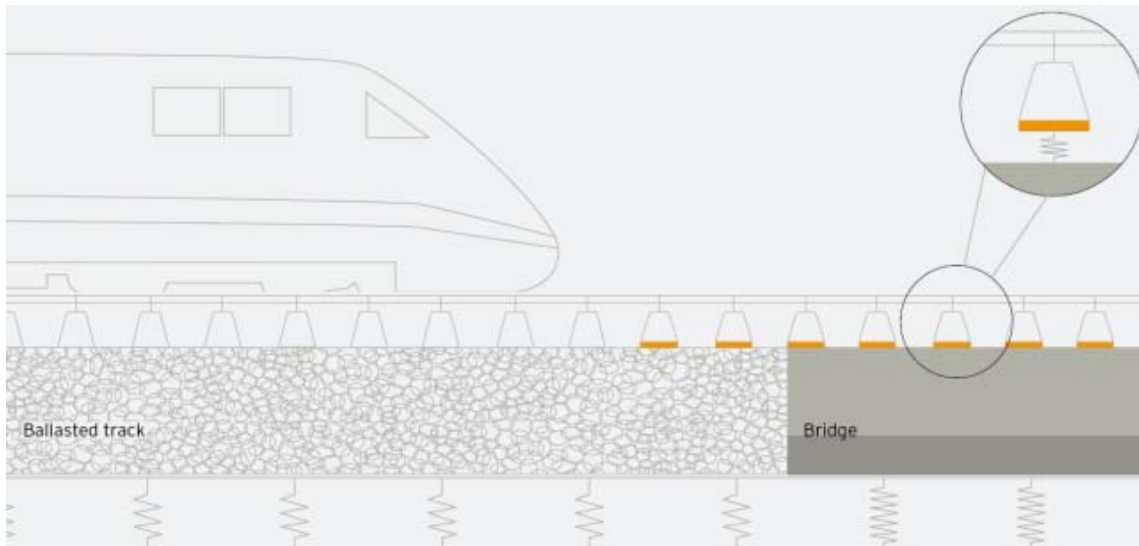
Pohjainten on arvioitu myös alentavan kiskoihin ja pölkkyihin kohdistuvia rasituksia junan pyörävikojen kohdalla. Hyvistä kokemuksista huolimatta on myös esitetty arvioita, että pohjainten elastisuudella olisi haitallisia vaikutuksia 200–300 Hz värähtelytaajuuksilla. Haitallisen taajuuden suuruuteen vaikuttaa pohjaimen ja myös välilevyn jäykkyys. Tyypillisesti pyöräviat aiheuttavat nopeilla rataosuuksilla tärinää juuri edellä mainitulla taajuuksialueella. (UIC 2009)



Kuva 5.17. Kuorman jakaantuminen pyöräkerrasta ratapenkereeseen pohjaimilla ja ilman pohjaimia (Getzner 2013a).

5.4.6 Radan pituussuuntaisten jäykkyyserojen pienentäminen

Radassa on osuuksia, joissa radan kokonaisjäykkyys voi teknisten reunaehtojen johdosta vaihdella lyhyelläkin matkalla. Tyypillisiä kohtia joissa jäykkyys voi muuttua merkittävästi ovat muun muassa siltojen päädyt, tunnelit ja vaihteet. Jäykkyyksmuutosalueilla raiteeseen ja kalustoon kohdistuva dynaaminen kuormitus voi kasvaa merkittävästi, minkä johdosta jäykkyyksmuutosalueille saatetaan joutua asentamaan alempia nopeusrajoituksia verrattuna muuhun rataosuuteen. Kasvanut dynaaminen kuormitus lisää raiteen komponenttien kulumista kasvattaen näin kunnossapidon tarvetta. Jäykkyyseroja voidaan pienentää pohjainten avulla. Jäykkyydeltään sopivat pohjaimet esimerkiksi ratapenkereen ja rautatiesillan liitoskohdassa (Kuva 5.18) tasaavat raiteen painumaeroa, mikä tuntuu niin sanotun töyssyn pienentymisenä junan kulkiessa siltarakenteelle ja siltä pois. Toisin sanoen kalustoon ja rataan kohdistuvat dynaamiset voimat pienenevät aikaansaaden kunnossapitotarpeen vähenemisen ja matkustusmukavuuden kasvamisen. (Getzner 2013a; Peltokangas et al. 2013; Ricardo et al. 2013)



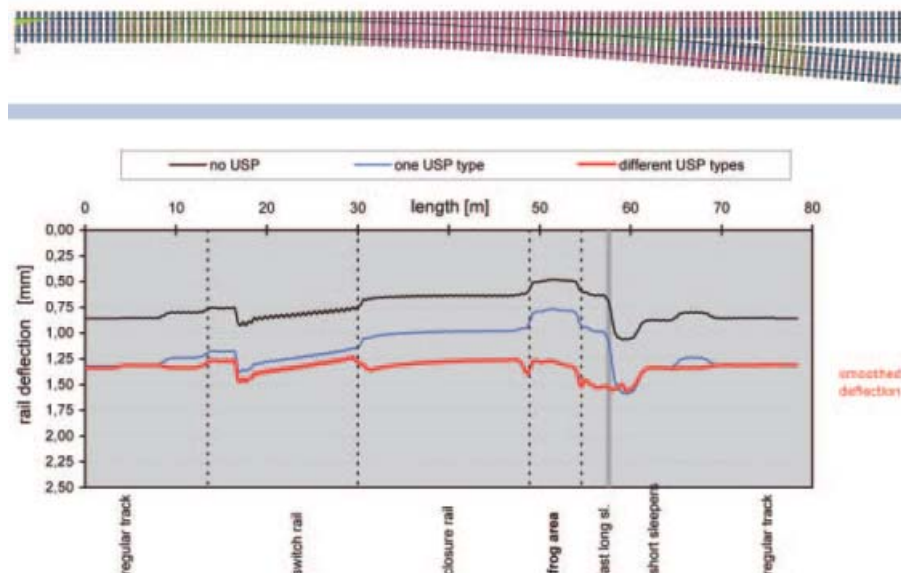
Kuva 5.18. Pystysuuntaisten jäykkyyserojen tasaaminen ratapenkereen ja rautatiesillan liitoskohdassa (Getzner 2013a).

Tällä hetkellä yksi yleisimmistä pohjainten käyttökohteista ovat vaihteet. Vaihteet ovat radassa selkeitä epäjatkuvuuskohtia, jotka kasvattavat raiteeseen ja kalustoon kohdistuvia dynaamisia kuormia. Jäykkyyden vaihtelu johtuu vaihteen useista erilaisista komponenteista, kuten esimerkiksi eripituisista pölkystä. Vaihteissa syntyvät dynaamiset iskukuormat saavat aikaan vaihtealueen nopeaa kulumista. Nopea kuluminen kasvattaa ylläpitokustannuksia ja vähentää matkustusmukavuutta. Linjarataa suuremmasta kunnossapitotarpeesta huolimatta esimerkiksi tuennan tekeminen on hankalampaa vaihteissa verrattuna muihin raiteen osuuksiin. Tästä syystä pohjainten käyttö vaihteissa on yleistynyt merkittävästi varsinkin Keski-Euroopassa. (Loy 2009)

Vaihteisiin voidaan asentaa jäykkyydeltään sama pohjain koko vaihteen matkalle tai tapauskohtaisesti voidaan laskennallisesti määrittää optimi pohjaimen jäykkyys jokaiselle vaihteen osuudelle erikseen esimerkiksi niin, että yhteen vaihteeseen asennetaan jäykkyydeltään neljää erilaista pohjainta. Tällä hetkellä esimerkiksi Itävallassa kaikkiin pääradan vaihteisiin asennetaan pohjaimet. Myös Suomessa on kokeiltu pohjainta Kauhavan vaihteessa. Mikäli kahden vaihteen etäisyys toisistaan on alle 125 m,

suosittelee pohjainvalmistaja Getzner asentamaan pohjaimet myös vaihteiden välissä oleviin tavallisiin linjaratapölkkyihin (Getzner 2013b.). Pohjaimet kasvattavat luonnollisesti vaihdepölkkyjen hintaa. Investointikustannukset ovat kuitenkin alhaisemmat verrattuna esimerkiksi sepelinalusmattoihin (Loy 2009).

Verrattuna linjarataan pohjaimen optimijäykkyyden määrittäminen vaihteissa on huomattavasti hankalampaa. Suurimpina syinä tähän on kiskojen vaihtelevat profiilit, vaihteiden vaatimat toimilaitteet ja turvallisuutta varmistavat rakenneratkaisut sekä vaihdepölkkyjen erilaiset mitat ja tuentatilat. Pohjainvalmistaja Getzner on kehittänyt FEM mallin pohjainten jäykkyyden optimoimiseksi vaihteissa. TTY:n toimesta mallin tarkemmasta toiminnasta pyrittiin saamaan tarkempaa tietoa, mutta pyynnöistä huolimatta lisätietoa ei saatu. Valmistajan mukaan mallilla pystytään arvioimaan kiskon pystysuuntaista liikettä, jonka avulla pystytään tilannekohtaisesti valitsemaan jäykkyydeltään sopiva pohjain kuhunkin vaihteen kohtaan. Oikein valitut pohjaimet tasottavat vaihteessa esiintyviä jäykkyyseroja. Kuva 5.19 esittää Getznerin mallin perusteella arvioitu pohjaimen vaikutus kiskon pystysuuntaiseen liikkeeseen vaihteessa. (Loy 2009)



Kuva 5.19. FEM mallin mukaan arvioitu pohjaimen vaikutus kiskon pystysuuntaiseen liikkeeseen vaihteessa. (Loy 2009)

Kuvasta (Kuva 5.19) voidaan havaita, että kiskon taipumaeroja saadaan pienennettyä optimoimalla pohjainten jäykkyys (punainen viiva) eri vaihteen osuuksille. Sen sijaan käytettäessä jäykkyydeltään yhdenlaisia pohjaimia (sininen viiva) koko vaihteessa ei kiskon taipumaerot juurikaan muutu verrattuna pohjaimettomaan vaihteeseen. Vaihteen kokonaisjäykkyys kuitenkin alenee. Tässä kohdassa on kuitenkin hyvä muistaa, että taipumaeroista huolimatta myös vakiojäykkyydestä pohjainta käytettäessä tukikerroksen sepeliin kohdistuvat rasitukset alenevat ja esimerkiksi sepelin hienontuminen vähenee. Tämä vaikuttaa suoraan vaihteen kunnossapitotarpeeseen. (Loy 2009)

5.4.7 Ratapölkkyihin kohdistuva rasitus

Pääsääntöisesti tutkimustuloksissa on todettu pohjainten alentavan yksittäisille pölkyille kohdistuvaa kuormitusta. Esimerkiksi Getzner on laskennallisesti arvioinut pohjaimen alentavan pölkkyyn kiskon kohdalle kohdistuvan kuorman 55 kN:sta arvoon 33 kN. Laskennassa akselipainona oli käytetty 220 kN. Lisäksi pohjainten on arvioitu estävän lähes täysin pölkyn keskelle muodostuvien taivutushalkeamien synnyn. (Getzner 2013b.). Myös Saksassa on arvioitu laskennallisesti pohjaimen vaikutusta pölkkyyn kohdistuviin kuormiin. Arvioiden mukaan 20 tonnin akselikuormasta pohjaimettoman pölkyn kiskon kohdalle kohdistuu noin 46 kN kuorma. Käytettäessä jäykkyydeltään 70 kN/mm pohjainta kohdistuu pölkkyyn kiskon kohdalle 39 kN kuorma, ja jäykkyydeltään 50 kN/mm pohjain alentaa kuorman 37 kN:iin. (Müller-Boruttau & Kleinert 2001)

Vaikka pohjainten arvioidaan alentavan pölkkyyn kohdistuvia rasituksia, on myös selkeitä mittaustuloksia siitä, että pohjaimet kasvattavat pölkyn värähtelyä. Tutkimuksissa ei ole kuitenkaan saatu varmuutta siitä, kasvattaako värähtely väsymisen aiheuttamien halkeamien riskiä. Myös pohjaimen ja välilevyn jäykkyyden suhteilla on havaittu olevan merkitystä pölkkyyn kohdistuviin rasituksiin. UIC:n pohjaimia koskevassa tutkimuksessa arvioitiin laskennallisesti pohjaimen ja välilevyn jäykkyyden merkitystä ratapölkkyyn kohdistuviin rasituksiin. Taulukko 5.4 esittää tiivistetysti tutkimuksesta saadut tulokset. Laskennassa on hyödynnetty soveltaen UIC:n yksiosaisen betoniratapölkyn suunnitteluohjetta (UIC 2004). Suunnitteluohjeesta poiketen laskennassa lisäkertoimena on käytetty dynaamista USP-tekijää ja muokattua kuormien jakautumiskerrointa raiteen pituussuunnassa. Taulukossa oleva distribution factor A kuvaakin yksittäiselle ratapölkylle kohdistuvan kuorman osuutta kokonaiskuormituksesta. Taulukosta voidaan havaita, että erittäin pehmeän pohjaimen käyttö jäykän välilevyn kanssa on pölkyn kannalta epäsuotuisin yhdistelmä. Laskennallisissa tarkasteluissa on arvioitu kyseisellä yhdistelmällä pölkyn halkeamariskin kasvavan verrattuna pohjaimettomiin pölkkyihin. Sen sijaan pehmeän välilevyn ja jäykän pohjaimen yhdistelmä (ei esitetty taulukossa) tai pehmeän välilevyn ja pehmeän pohjaimen yhdistelmä voisi sallia jopa akselipainojen noston pölkkytyyppiä muuttamatta. On kuitenkin syytä muistaa, että teoreettinen malli ei välttämättä täysin kuvasta pölkyn käyttäytymistä radassa. (Schneider et al. 2011; UIC 2009)

Taulukko 5.4. Laskennallisesti arvioitu pohjaimen ja välilevyn jäykkyyden vaikutus pölkkyyn kohdistuviin rasituksiin. (UIC 2009)

Typical Combinations of Track components	Standard track	Standard track	USP track	USP track	USP track	USP track
Rail pad cp (kN/mm)	600	60	600	60	60	600
USP	no USP	no USP	very soft USP	very soft USP	soft USP	hard USP
Effects on sleepers	normal	less vibration	more vibration	longitudinal load distribution		
				good		average
				distribution factor A		
				0,25	0,35	0,45
Static bending moment	normal	slightly reduced	highly reduced	maximum reduction	fairly reduced	slightly reduced
Dynamic bending moment	normal	reduced	considerably increased	increased	normal	normal
Consequences for sleeper design	-	no change	risk of cracks	no change	higher sleeper loads possible	
Recommended application	-	favourable	to be avoided	less favourable	optimal	favourable

5.4.8 Raiteen sivusuuntainen vastus

Pystysuuntaisten voimien lisäksi raiteeseen kohdistuu vaakasuuntaisia voimia. Erityisesti jatkuvakiskoraiteiden yleistyttyä ratapölkyn oleellinen tehtävä on tarjota raiteelle sivuttainen tuki, sekä kaarteessa että suoralla rataosuudella. Ratapölkky välittää vaakasuuntaiset voimat tukikerrokselle. Pölkyn vaakasuuntaisten voimien välityskykyyn vaikuttaa kiskon ja pölkyn välinen kitka, pölkyn ja tukikerroksen välinen kitka, pölkkyä ympäröivän sepelin ominaisuudet sekä pölkyn muotoilu. (Esveld 2001)

Pohjainten käytöllä saattaa olla vaikutusta pölkyn alapinnan ja tukikerroksen välisen raidevastuskomponentin suuruuteen. Kyseinen raidevastuksen osa on tavallista pölkkyä käytettäessä noin 30–50 % kokonaisvastuksesta riippuen raide-elementin paikasta ja pölkyn alapinnan karheudesta. (Auer et al. 2013; VR 2011)

Maailmalla on tutkittu jonkin verran pohjainten vaikutusta radan sivusuuntaiseen vastukseen. Kokeista saadut tulokset ovat olleet jossain määrin ristiriitaisia keskenään. Joissain testeissä pohjainten on todettu kasvattavan tai pitävän ennallaan sivusuuntaisen vastuksen, kun taas Sveitsissä tehdyissä kokeissa on arvioitu sivusuuntaisen vastuksen alentuvan pohjainten asennuksen myötä. Lisäksi käytetyn pohjaimen jäykkyydellä on arvioitu olevan hieman vaikutusta sivuttaisen vastuksen suuruuteen. (Perpinya 2012; Schneider et al. 2011)

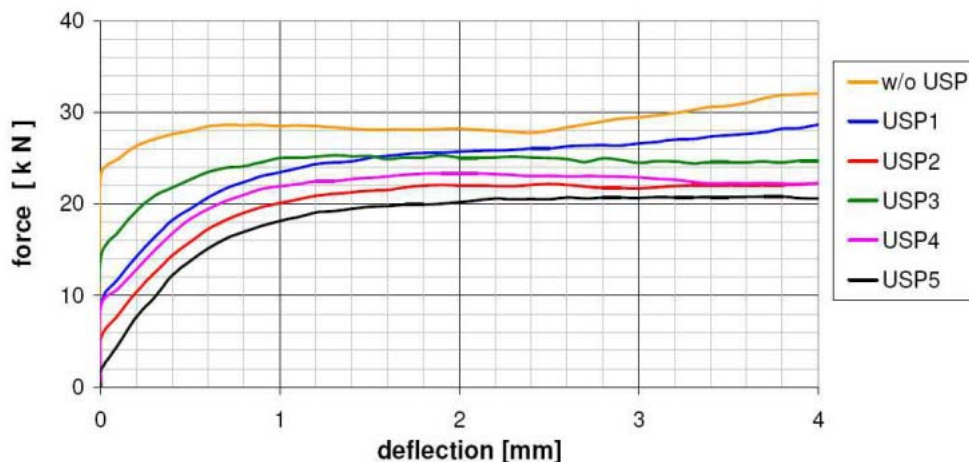
Saksassa rakennettiin koeosuus pohjainten tutkimista varten. Koeosuus sisälsi pölkkyjä joissa ei ollut pohjaimia, pölkkyjä joissa oli jäykkä pohjain ja pölkkyjä joissa oli pehmeä pohjain. Taulukko 5.5 esittää kokeissa käytetyt pohjaimet ja mitatut sivusuuntaiset vastukset. Mittaukset tehtiin kaksi vuotta pölkkyjen asentamisen jälkeen ja koekohteessa oli kyseisen kahden vuoden ajan normaali junaliikenne. (Perpinya 2012; Müller-Boruttau & Kleinert 2001)

Taulukko 5.5. Saksassa tehtyjen kokeiden perusteella määritetyt sivusuuntaiset vastukset (Müller-Boruttau & Kleinert 2001).

Pohjain	Ei käytetty	Jäykkä	Pehmeä
Jäykkyys (kN/mm)	-	70	30
Ratapölkyn sivusuuntainen vastus (kN)	9,7	10,3	9,4

Taulukosta voidaan havaita, että koeosuudella tehdyn tutkimuksen perusteella pohjaimilla ei ole juurikaan merkitystä raiteen sivusuuntaiseen vastukseen.

Myös luvussa 5.4.4 esitetyssä Sveitsiin rakennetussa koekohteessa arvioitiin pohjaimen vaikutusta radan sivusuuntaiseen vastukseen. Sivusuuntaista vastusta määritettäessä kiskonkiinnitykset irrotettiin mitattavista pölkyistä ja välilevyt poistettiin. Välilevyjen tilalle asennettiin rasvatut teräslevyt. Ratapölkkyyn kohdistettiin sivusuuntainen kuorma samalla siirtymää mitaten. Sivusuuntainen vastus määritettiin jokaiselta koeosuudelta neljästä ratapölkystä. Kuva 5.20 esittää koeosuudella mitatut pölkkyjen sivusuuntaiset vastukset. Kuvan esittämät sivusuuntaiset vastukset eivät ole kuitenkaan suoraan vertailukelpoisia taulukossa (Taulukko 5.5) esitettyjen Saksassa tehtyjen kokeiden perusteella määritettyjen vastusten kanssa. Syynä tähän on käytettyjen mittausten menetelmien ja tulosten esitystavan eroavaisuudet.



Kuva 5.20. Sveitsiin tehdyllä koeosuudella havaitut pölkyn sivusuuntaiset vastukset. (UIC 2009)

Kuvasta (Kuva 5.20) voidaan havaita, että mittaustulosten perusteella ilman pohjainta olevilla pölkyillä olisi suurin sivusuuntainen vastus. Pienin sivusuuntainen vastus havaittiin pölkyissä, joissa oli käytetty pehmeintä pohjainta (USP5). Näin ollen tutkimuksen perusteella pohjain alentaa sivusuuntaista vastusta. Huomion arvoista on kuitenkin se, että vastus määritettiin kuormittamattomasta raiteesta. Kun raidetta kuormitetaan pystysuuntaisesti kasvaa pölkyn ja tukikerroksen välinen kitkavoima. Pohjaimellisen ja pohjaimettoman pölkyn sivusuuntaisen vastuksen ero kuormitetussa raiteessa saattaisi olla huomattavasti pienempi. Kuvasta (Kuva 5.20) voidaan myös havaita, että pohjaimilla varustetut pölkkyt lähtivät liikkeelle merkittävästi pienemmillä voimilla verrattuna pohjaimettomaan pölkkyyn. Esimerkiksi pehmeimmällä pohjaimella varustetut pölkkyt osuudella USP5 vaativat liikkeelle lähteäkseen ainoastaan noin 10 % siitä sivusuuntaisesta voimasta, jolla pohjaimettomat pölkkyt lähtivät liikkumaan. Osittain alhainen voima saattaa selittyä sillä, että pohjain on alkanut jous-

tamaan sivusuunnassa vaikka pohjaimen alapinta olisi lähes lähtötilanteessa. Testiradalla tehtiin myöhemmin kokeita kuormittamattoman raiteen lisäksi myös kuormitetulle raiteelle kahdella eri tavalla. Molempia testaustapoja käytetään yleisesti Keski-Euroopassa. Eri menetelmillä saadut tulokset erosivat toisistaan. Lisäksi kentältä saadut tulokset erosivat myös laboratoriokokeissa saaduista tuloksista. Näin ollen koetulosten perusteella ei voida täydellä varmuudella sanoa pohjaimen merkitystä raiteen sivusuuntaiseen vastukseen. (Auer et al. 2013; Perpinya 2011; UIC 2009)

Pohjainten valmistaja SATEBA on havainnut kenttätutkimuksissaan vuonna 2006, että elastisen materiaalin käyttö pölkkyjen alla kasvattaa sivusuuntaista vastusta keskimäärin 9 %. Tehtyjä tutkimuksia valvoi UIC. (Perpinya 2011)

Zagrebin yliopistossa tehdyissä laboratoriotutkimuksissa arvioitiin pohjainten lisäävän raiteen sivusuuntaista vastusta noin 9 %. Tulos vastaa SATEBA:n tekemissä kenttäkokeissa havaittua vastuksen kasvamista. (Perpinya 2011)

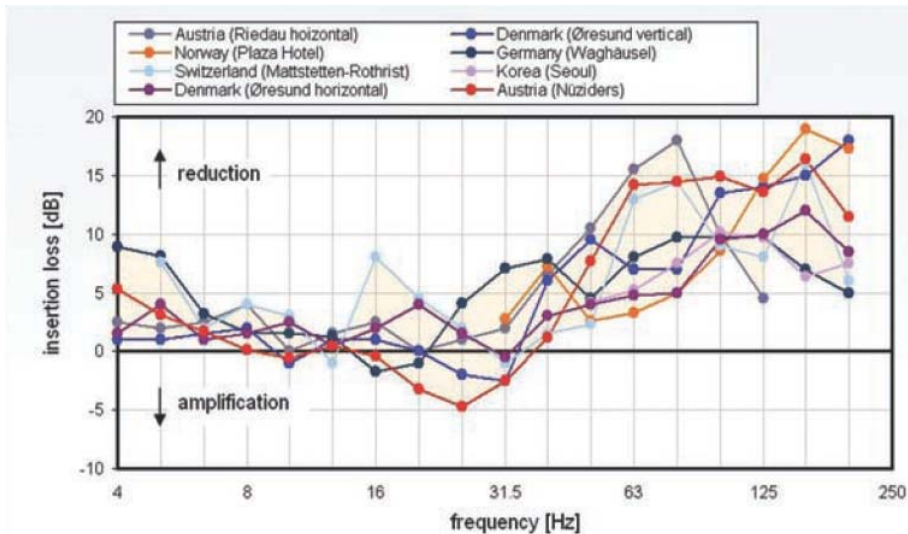
Eri tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella ei voida täydellä varmuudella sanoa pohjainten vaikutusta raiteen sivusuuntaiseen vastukseen. Pääsääntöisesti tutkimuksissa on kuitenkin arvioitu pohjainten vaikuttavan vain vähän vastukseen varsinkin jos pohjaimen jäykkyys ei ole alhainen. Osittain tästä johtuen esimerkiksi Deutsche Bahn, Société Nationale des Chemins de Fer Français ja Österreichische Bundesbahnen käyttävät pääsääntöisesti tiukoissa kaarteissa pohjaimia.

5.4.9 Tärinän ja runkomelun vaimennus

Raideliikenteen välittömään läheisyyteen rakentaminen on junaliikenteestä syntyvän runkomelun ja tärinän vuoksi pakottanut tietyillä alueilla ja maaperäolosuhteilla keksimään keinoja vaimentaa runkomelua ja tärinää. Runkomelulla tarkoitetaan maahan välittyvän tärinän vaikutuksesta rakennuksissa syntyvää melua. Runkomelun taajuus katsotaan tyypillisesti olevan välillä 4–80 Hz (Schmid 2010.). Monessa kohteessa vaimentavana elementtinä on käytetty sepelinalusmattoa. Nykyään pohjain on kuitenkin monessa tilanteessa osoittautunut hyväksi ja kustannustehokkaaksi ratkaisuksi vaimentamisen parantamiseksi. (Loy 2012; Müller 2007)

Pohjaimilla on saavutettu merkittävää hyötyä verrattuna ilman pohjaimia oleviin pölkkyihin. Pohjaimilla saavutettava vaimennus on merkittävää erityisesti taajuudeltaan yli 40 Hz värähtelyssä (UIC 2009.). Tämä on arvioitu erittäin hyödylliseksi erityisesti tukikerroksen sepelin kannalta, sillä tukikerroksen stabiiliuden kannalta haitallimpana värähtelytaajuutena pidetään väliä 50–150 Hz (Loy 2008).

Pääasiassa Euroopassa rakennetuissa koekohteissa on havaittu pohjainten alentavan runkomelua 8–15 dB taajuusvälillä 50–150 Hz. Kuva 5.21 esittää eri koekohteissa pohjaimilla saavutettuja runkomelun vaimennusta. (Loy 2008)



Kuva 5.21. Koekohteilla mitattuja pohjaimien vaimennusominaisuuksia. (Loy 2008)

Vuonna 2008 Antwerpenin ja Brysselin välille rakennetulla pohjainten koeosuudella pyrittiin muun muassa arvioimaan pohjainten vaimennusominaisuuksia. Osuudelle asennettiin pölkkyjä, joihin oli asennettu jäykkyydeltään 12 erilaista pohjaintyyppiä. Mittauksissa pyrittiin eliminoimaan pohjamaasta ja eri kalustoista johtuvat vaihtelut. Tutkimuksissa havaittiin, että runkomelun ja tärinän vaimennukseen parhaiten soveltuvat jäykkyydeltään pehmeät pohjaimet. Esimerkiksi pehmeän pohjaimen vaimennuskyky on noin 6 dB suurempi verrattuna jäykkiin pohjaimiin (Auer et al. 2013.). Pohjaimen jäykkyyden valintaa koskien onkin useiden tutkimusten perusteella tehty johtopäätös, että pohjaimelle valittava jäykkyys on kompromissi maahan välittyvän värähtelyn ja raiteeseen kohdistuvien värähtelyhuippujen alentamisen välillä (Schneider et al. 2011).

Myös Suomessa on testattu pohjainten runkomelun vaimennusominaisuuksia. Pituudeltaan 55 m oleva koeosuus rakennettiin Vantaankosken radalle vuonna 2009. Osuudella käytetyt pohjaimet olivat Getznerin valmistamia Sylomer SLS 1010G-pohjaimia. Koekohteella tehtyjen havaintojen perusteella voitiin todeta pohjainten vaimentaneen lähijunaliikenteen (Sm1, Sm2 ja Sm3) aiheuttamaa runkomelua 2–7 dB hieman kalustotyyppistä riippuen. (Peltonen & Backholm 2009)

Pehmeiden pohjaimen runkomelua vähentävistä ominaisuuksista huolimatta joissain tutkimuksissa on havaittu ilman kautta välittyvän melun kasvaneen. Syynä tähän on se, että pehmeä pohjain aiheuttaa kiskoihin ja pölkkyihin suurempia kiihtyvyyksiä aikaansaaden näin korkeampia värähtelytasoja. (Asmussen 2011)

5.5 Tukikerros

Tukikerros koostuu Suomessa tyypillisesti raekooltaan 31,5...63 mm murskatusta kallioliiviaineksesta, josta käytetään yleisemmin nimitystä raidesepeli. Alempiluokkaisilla radoilla on käytössä myös raidesoraa. Tukikerroksen tehtäviin kuuluu muun muassa raiteen pitäminen geometrisesti oikeassa asemassa, kuormien jakaminen alusrakenteelle ja raiteen geometrian korjaamisen mahdollistaminen. (RATO 11)

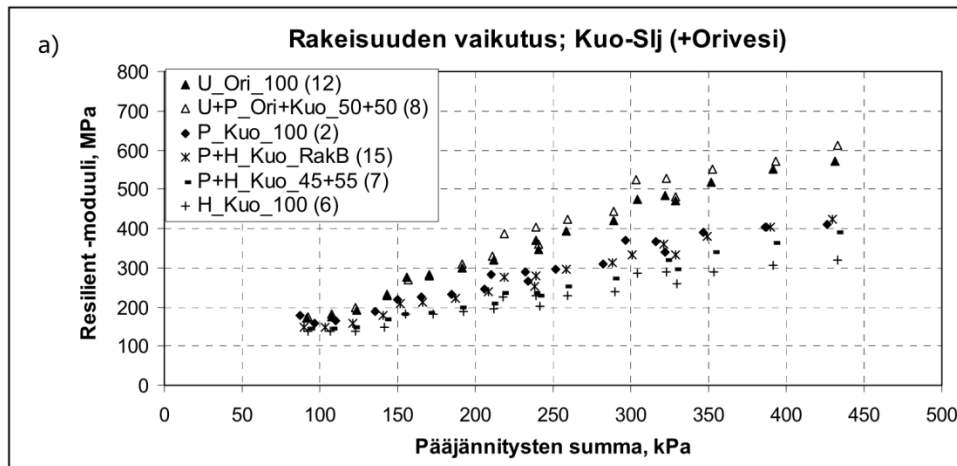
Radan jäykkyyden ja erityisesti jäykkyyden mittaamisen kannalta tukikerros on hyvin merkittävä radan rakenneosana. Selkeyden vuoksi tarkastelu kannattaa jakaa kahteen tilanteeseen: tilaan, jossa ratapölkkyt tukeutuvat optimaalisesti tai lähes optimaalisesti tukikerrokseen ja tilanteeseen, jossa ratapölkkyjen päiden alueella ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen välissä on kuormittamattomassa tilanteessa tyhjätila. Kumulatiivisen liikennekuormituksen ollessa, tukemisen ohella, Suomen rataverkolla raideseppelin kulumiseen määräävästi vaikuttava tekijä (Nurmikolu & Kolisoja, 2011), tukeutumistilanne vääjäämättä heikkenee liikennöinnin myötä, mikä saattaa johtaa tyhjätilojen muodostumiseen ratapölkkyjen alle. Ruotsissa tehtyjen mittausten (Lundqvist & Dahlberg, 2005) mukaan tällaiset tukeutumattomat tai heikosti tukeutuneet ratapölkkyt ovat verrattain yleisiä. Kyseisissä mittauksissa tehtyjen havaintojen mukaan tyhjätilat ovat tyypillisesti pieniä, noin 0,2 mm korkuisia, mutta niillä on taipumus kasvaa kiihtyvällä nopeudella tyhjätilasta kyseisen ratapölkyn kohdalle aiheutuneen dynaamisen kuormituslisäyksen takia.

Ensimmäisessä tilanteessa, jossa ratapölkkyt tukeutuvat kauttaaltaan tukikerrokseen, tukikerroksen vaikutus koko ratarakenteen jäykkyyteen riippuu tukikerroksen palautuvasta muodonmuutoskäyttäytymisestä. Karkearakeisten maa-ainesten palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä voidaan kuvata resilient-moduulin avulla. Nurmikolu ja Kolisoja (2010) ovat tehneet rakeisuudeltaan erilaisille raidesepeleille kattavan kolmiaksiaalikoesarjan, jossa tarkasteltiin erityisesti raideseppelin rakeisuuden vaikutusta resilient-moduuliin. Taulukossa (Taulukko 5.6) on esitetty koesarjassa käytetyt materiaalit ja niiden rakeisuusluvut. Rakeisuusluku lasketaan 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summana ja raideseppelin puhdistusrajana pidetään rakeisuuslukua 88...90.

Taulukko 5.6. Nurmikolun ja Kolisojan (2010) kolmiaksiaalikoesarjassa käyttämät materiaalit, niiden rakeisuusluvut ja tunnisteen selitteet.

Koe nro	Materiaalin tunniste	Rakeisuusluku	Tunnisteen selitteet
Koe 1	U_Ori_100	2	U = uusi P = palautettu H = hylky Ori = Orivesi (uusi) Loi = Loimaa (uusi) Kuo = Kuo-Slj rataosa (palautettu tai hylky) Tjl = Tjl-Tku rataosa (palautettu tai hylky) Mix = Uusien sepeleiden seos (Ori & Oikorata) luku = materiaalin prosenttiosuus näytteessä RakA = rakennettu rakeisuus A RakB = rakennettu rakeisuus B
Koe 2	P_Kuo_100	9	
Koe 4	P_Tjl_100	13	
Koe 5	U+P_Ori+Tjl_50+50	8	
Koe 6	H_Kuo_100	171	
Koe 7	P+H_Kuo_45+55	98	
Koe 8	U+P_Ori+Kuo_50+50	6	
Koe 9	H_Tjl_100	154	
Koe 10	P+H_Tjl_50+50	83	
Koe 11	U_Loi_100	1	
Koe 12	U_Ori_100	2	
Koe 13	U_Ori_RakA	4	
Koe 14	U+P_Ori+Kuo_50+50	6	
Koe 15	P+H_Kuo_RakB	40	
Koe 16	U_Mix_RakB	40	

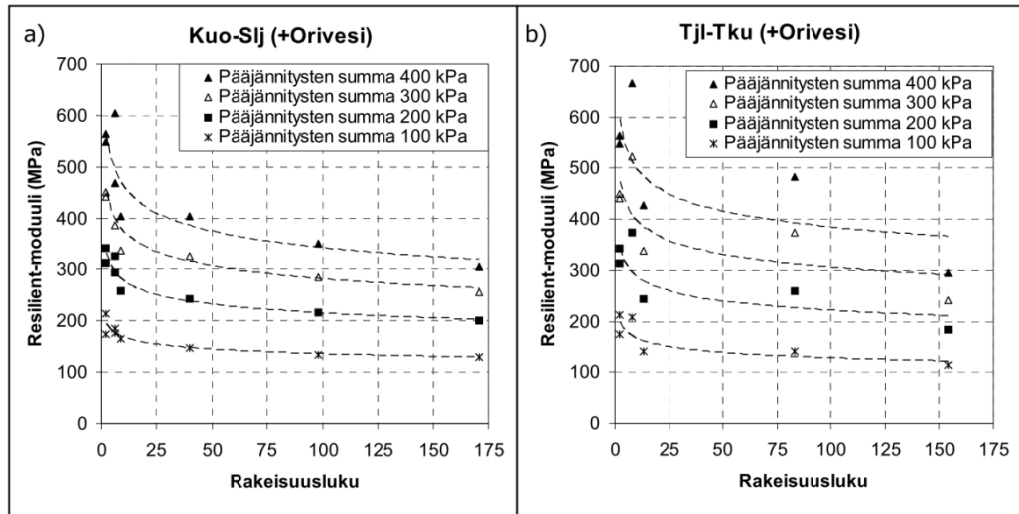
Tarkemmat rakeisuuskäyrät kokeissa käytetyille materiaaleille ja koejärjestelyjen kuvaus ovat löydettävissä Liikenneviraston Tutkimuksia ja selvityksiä -sarjan julkaisusta 11/2010 ”Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raideseppelin ominaisuuksiin”. Kuvasta (Kuva 5.22) on esitetty ote eri rakeisuuksilla saaduista resilient-moduuleista Kuo-Slj-rataosalta ja vertailuna koe, jossa kyseisellä rataosalla rataa palautettuun materiaaleihin on lisätty uutta Oriveden sepeliä (koenumero 8) sekä pelkkä uuden Oriveden sepelin koe (koenumero 12).



Kuva 5.22. Rakeisuuden vaikutus resilient-moduuliin. Selitteessä materiaalit ovat järjestyksessä karkearakeisimmasta hienorakeisimpaan. Koenumero on sulkeissa selitteen perässä. (Nurmikolu & Kolisoja, 2010)

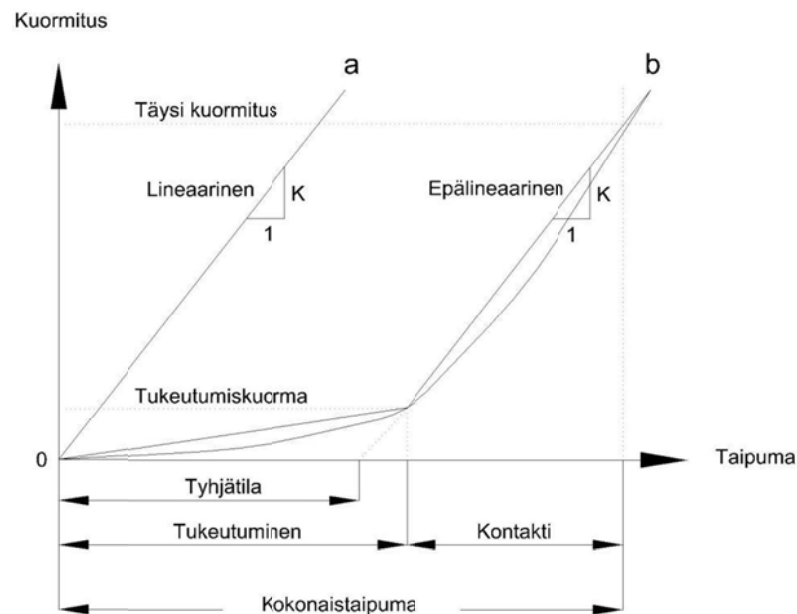
Kuvasta (Kuva 5.22) havaitaan, että pääsääntöisesti karkearakeisemmat materiaalit saavuttivat suuremmat resilient-moduulit. Selkeästi suurimmat resilient-moduulit saavutettiin uudella raidesepelillä sekä uuden ja rataa palautetun sepelin seoksella (koenumerot 12 ja 8). Toisaalta esimerkiksi rataa palautetun materiaalin (koenumero 2) ja raidesepelin puhdistusrajaa vastaavan rakeisuuden omaavan materiaalin (koenumero 7) resilient-moduulit ovat melko lähellä toisiaan. Tjl-Tku-rataosan materiaaleilla puhdistusrajaa vastaavalla rakeisuudella (koenumerot 4 ja 10 Taulukko 5.6) jäykkyys oli jopa hieman suurempi kuin vastaavilla materiaaleilla Kuo-Slj-rataosalla (koenumerot 2 ja 7 Kuva 5.22). Nurmikolun ja Kolisojan (2010) mukaan tämä viestii siitä, että rataa palautettavan särmiltään pyöristyneitä rakeita sisältävän materiaalin jäykkyys ei ole ilman täydentävää uutta terävsärmäistä raidesepeliä oleellisesti parempi kuin hienontuneella tukikerrosmateriaalilla ennen sepelinpuhdistusta. Myös Ishikawan (2005) ja Indraratnan & Salimin (2005) havainnot omissa kolmiaksisiaalisissa kuormitustarkasteluissa tukevat sepelirakeiden pyöristyneisyyden merkitystä tukikerroksen pystysuuntaisten muodonmuutosominaisuuksien osalta.

Kuvaa (Kuva 5.23) on tarkasteltu Nurmikolun ja Kolisojan (2010) havainnoimaa resilient-moduulin yhteyttä raidesepelin rakeisuuslukuun. Resilient-moduuli on suuri uusilla tai erittäin vähän hienorakeista ainesta sisältävillä raidesepeleillä. Kuvasta (Kuva 5.23) havaitaan myös, että resilient-moduuli pienenee aluksi nopeasti rakeisuusluvun kasvaessa nollasta suunnilleen rakeisuuslukuun 10...30 asti, minkä jälkeen rakeisuusluvun edelleen kasvaessa moduulin aleneminen hidastuu.



Kuva 5.23. Resilient-moduulin yhteys raideseppelin rakeisuuslukuun a) Kuo-Slj-rataosan ja b) Tjl-Tku rataosan materiaaleille tehdyissä kokeissa. Molemmissa kuvissa on mukana myös kokeet, joissa materiaaleihin lisättiin ”täydennyssepinä” Oriveden uutta sepeliä sekä pelkällä Oriveden uudella sepelillä tehty koe. (Nurmikolu & Kolisoja, 2010)

Tilanne, jossa ratapölkkyjen ja tukikerroksen välissä on tyhjätiloja, on ongelmallinen erityisesti jäykkyyden mittaamisen näkökulmasta, sillä edellä kuvatun prototyypin kaltaisessa mittauksessa tyhjätilojen osuus mitatusta kokonaispainumasta jää epäselväksi mittaustuloksen ollessa mahdollisen tyhjätilan ja ratarakenteen kokoonpuristumisen summa. Tyhjätilan merkitys mittaustulokseen havainnollistuu hyvin Sussmannin et al. (2001) esittämästä kuvasta (Kuva 5.24), jossa kuvataan radan tyypillistä kuormitus-taipuma-käyttäytymistä. Kuvan (Kuva 5.24) käyrä a kuvaa ideaalitapausta, jossa rata on erinomaisessa kunnossa ja käyrä b kenties todellisempaa tilannetta, jossa ratapölkkyjen tukeutuminen on enemmän tai vähemmän epätäydellistä.



Kuva 5.24. Radan tyypillinen kuormitus-taipuma-käyttäytyminen. Muokattu lähteestä Sussmann et al. (2001)

Ratapölkyn ollessa kontaktissa tukikerrokseen, on radan kuormitus-taipuma-käyttäytyminen lähes lineaarista, mitä kuvaa käyrän a ja käyrän b loppuosan sama kulmakerroin. Tarkasteltaessa käyrän b alkuosaa nähdään, että tyhjätilasta johtuen taipuma kasvaa verrattain nopeasti alhaisellakin kuormitustasolla. Sussmannin et al. (2001) mukaan tyhjätila voidaan määrittää käyrän b lineaarisen loppuosan jatkeen ja taipuma-akselin leikkauskohdan avulla. Näin määriteltynä tyhjätila kuvaa taipuma-osuutta, jolla ei teoriassa ole lainkaan kuormituksen vastustuskykyä. Mittausnäkökulmasta myös käyrän b tapauksessa radalla kulkevan liikenteen kokema palautuva painuma tulee mitatuksi oikein tyhjätiloineen, sillä mittaustulos edustaa radan kokonaisjäykkyyttä. Joissakin tarkasteluissa olisi perusteltua pyrkiä erottamaan tyhjätilan osuus varsinaisesta ratarakenteen jouston aiheuttamasta painumasta.

Mittausteknisesti tyhjätilan suuruuden mittaamiseen Stiffmasterilla on kaksi periaatteellista mahdollisuutta: mittauksen tekeminen kahdella erillisellä mittauskerralla erisuuruisilla kuormituksilla, joista kevyempi vastaa kuvassa (Kuva 5.24) esitettyä tukeutumiskuormaa tai mittauksen tekeminen yhdellä mittauskerralla kahdella eri kuormituksella. Stiffmaster soveltuu myös erilaisilla kuormilla tehtäviin mittauksiin, mutta mittalaite pitää kiinnittää sellaiseen kalustoon, että kuormituksen säätely on mahdollista. Toinen mahdollisuus olisi lisätä tukeutumiskuormaa vastaava akseli mittalaitteeseen.

Tyhjätilan mittaamiseen vaadittavan tukeutumiskuorman suuruutta voidaan arvioida kirjallisuuslähteiden avulla. Read et al. (1994) käyttivät omissa mittauksissaan tukeutumiskuormana 22,25 kN pyöräkuormaa, Fröhling (1997) väitöksessään pienimpänä kuormitusportana 29 kN pyöräkuormaa ja EUROBAL II-projektissa Berggrenin (2009) mukaan pienimpänä kuormituksena käytettiin 10 kN pyöräkuormaa. Wangqin-gin et al. (1997) mukaan CARSin (*China Academy of Railway Sciences*) kevyen ja raskaan mittavaunun yhdistelmässä kevyen vaunun pyöräkuorma on 20 kN, minkä on katsottu riittävän tyhjätilojen eliminoimiseen mittaustuloksesta. Edellä mainitut kuormitukset ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia ja Suomen rataverkolla käytettävä tukeutumiskuorma tulisi määrittää tarkemmin joko laskennallisesti tai kokeellisesti. Myös tukeutumiskuorman muuntelumahdollisuudesta voisi olla hyötyä, sillä tukeutumiskuorma todennäköisesti vaihtelee jonkin verran erilaisten päällysrakenteiden välillä.

Stiffmasterin kiinnitysmahdollisuuden rakentaminen esimerkiksi raskaaseen tavaravaunuun antaisi mahdollisuuden mittauksien tekemiseen erilaisilla kuormituksilla. Tämä mahdollistaisi tietyissä rajoissa tukeutumiskuorman ja täyden kuormituksen tapauskohtaisen ja tarkoituksenmukaisen valitsemisen. Tukeutumiskuormaa vastaavan mittausakselin lisääminen itse mittalaitteeseen mahdollistaisi sekä tukeutumiskuorman että täyden kuorman aiheuttaman palautuvan painuman mittaamisen yhdellä mittausajolla. Nykyiselläänkin Stiffmasterin mittaama kokonaisjousto pitää sisällään tiedon myös tuentatarpeesta vaikka tyhjätilaa ei erikseen mitata. Esimerkiksi palautuvan painuman pienipiirteinen vaihtelu saattaisi olla merkki tuentatarpeen lähestymisestä.

Yhteenvetona tukikerroksen vaikutuksien osalta voidaan todeta, että ideaalitapauksessa eli radan ollessa erinomaisessa kunnossa, tukikerroksessa kuormitettaessa syntyvän palautuvan painuman suuruuteen vaikuttaa määräävästi raidesepelin raekokojakauma siten, että myös sepelirakeiden pyöristyneisyydellä on merkittävä vaikutus. Esimerkiksi Nurmikolun ja Kolisojan (2010) tekemässä koesarjassa käytettyjen materiaalien ääripäiden resilient-moduulien ero oli erittäin huomattava uuden karkean

raidesepelin resilient-moduulin oltua yli kaksinkertainen verrattuna heikoimpaan hylkysepeleihin. Resilient-moduulin vaikutus itse palautuvan painuman lukuarvoon on kuitenkin verraten pieni, sillä pölkyn alapuolella oleva 0,3 metrin paksuinen sepelekerros kokoonpuristuu SR2:n vaikutuksesta (pääjännitysten summa noin 250 kPa) parhaan sepelein, Resilient-moduuli $M_r = 500$ MPa, tapauksessa noin 0,15 mm ja heikkolaatuisen sepelein $M_r = 250$ MPa tapauksessa noin 0,3 mm. Lisäksi kuormitusvaikutus pienee nopeasti syvyyden kasvaessa.

Epätäydellisesti tukikerrokseen tukeutuneiden ratapölkkyjen vaikutus voi olla selvästi edellä arvioitua suurempi. Tämän selvittämiseksi tulisi jäykkyysmittauksessa pyrkiä mittaamaan erikseen ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan suuruus eli käytännössä tietuentalanteesta nollakuormituksen ja tukeutumiskuormituksen välillä sekä varsinaisen ratarakenteen taipuma tukeutumiskuorman ja täyden kuormituksen välillä.

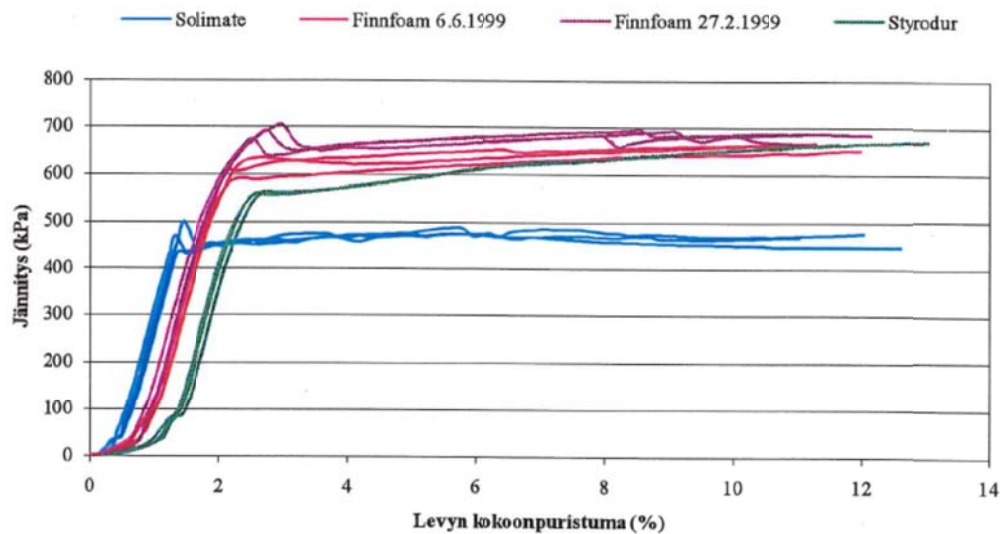
Radan kokonaisjäykkyyden modifioinnin näkökulmasta tukikerrosta parantamalla voidaan lisätä radan jäykkyyttä merkittävästi silloin, kun ratapölkkyjen alla on tyhjätillaa. Myös tukikerrosmateriaalin valinnalla voidaan vaikuttaa hieman radan jäykkyyteen. Tukikerroksen kohdalla lienee kokonaistaloudellisinta tavoitella aina mahdollisimman suurta jäykkyyttä raidesepelin rakeisuuden ja muiden ominaisuuksien sekä mahdollisesti myös tukikerroksen poikkileikkauksen kautta, sillä tukikerroksen suuri jäykkyys muiden positiivisten vaikutusten lisäksi tyypillisesti edesauttaa raiteen geometrian pysyvyyttä ja näin ollen ehkäisee jo mainittujen ratapölkyn alapuolisten tyhjätilojen syntymistä.

5.6 Routalevy

Routalevyjä käytetään routahaittojen ehkäisemiseksi vanhoissa ratapenkereissä, joiden rakennekerrospaksuus ei ole riittävä estämään routarajan tunkeutumista pohjaan. Routalevyinä käytetään nykyisin suuren puristuslujuuden omaavia suulakepuristettuja polystyreenilevyjä, joista käytetään lyhennettä XPS, eXtruded PolyStyrene. Routalevyn käytön tavoitteena on lisätä rakenteen lämmöneristävyyttä, jotta maaperään varastoitunut lämpö ei karkaa pois rakenteesta ja routalevyn alapuolinen ratarakente pysyy talvella sulana. Routalevyjen tekniset toimitusehdot määrittelevät lukuisia routalevyn ominaisuuksia, joista tärkeimmät lienevät lämmönjohtavuus ja mekaanisista ominaisuuksista puristuslujuus. Tekniset toimitusehdot eivät kuitenkaan ota varsinaisesti kantaa levyn jäykkyyteen.

Teknisten toimitusehtojen määrittelyä varten on TTY:llä tehty (Nurmikolu & Kolisoja 2001) routalevyjen puristuskokeita (Kuva 5.25), joista routalevyn jäykkyyttä voidaan haarukoida. Routalevy asennetaan ratarakenteeseen tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä raidesepelin alapuolelle. Joissakin harvemmissä tapauksissa levy on asennettu myös välikerroksen alapuolelle tai tukikerros levyn yläpuolella on kasvanut tavallista suuremmaksi painumien korjaamisen seurauksena. Staattinen maarakenteista tuleva pystysuuntainen levyn kohdistuva pystykuormitus on siten noin 10–15 kPa. Liikenteestä tuleva kuormitus riippuu niin ikään levyn asennussyvyydestä, mutta myös akselipainosta ja radan jäykkyydestä. Ratarakenteesta mitattujen ja mallinnettujen jännitysten perusteella 250 kN:n akselipainon on arvioitu aiheuttavan routalevyn syvyydelle noin 110 kPa pystysuuntaisen jännityksen (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Kuvaa (Kuva 5.25) arvioiden jännitysvaihtelua 10–110 kPa vastaava levyn kokoonpuristuma olisi noin 0,3–1,0 % levyn paksuudesta. Puristuskokeen alussa on kuitenkin levyn pinnan epätasaisuudesta aiheutuvaa tavallista suurempaa kokoonpuris-

tumaa ja oikea tapa lienee määrittää levyn kokoonpuristuma lineaariselta osuudelta 30 kPa:n jännityksen yläpuolelta. 100 kPa:n vaihteluvälillä saataisiin levyn kokoonpuristumaksi kaikissa kokeissa noin 0,3 % levyn paksuudesta.

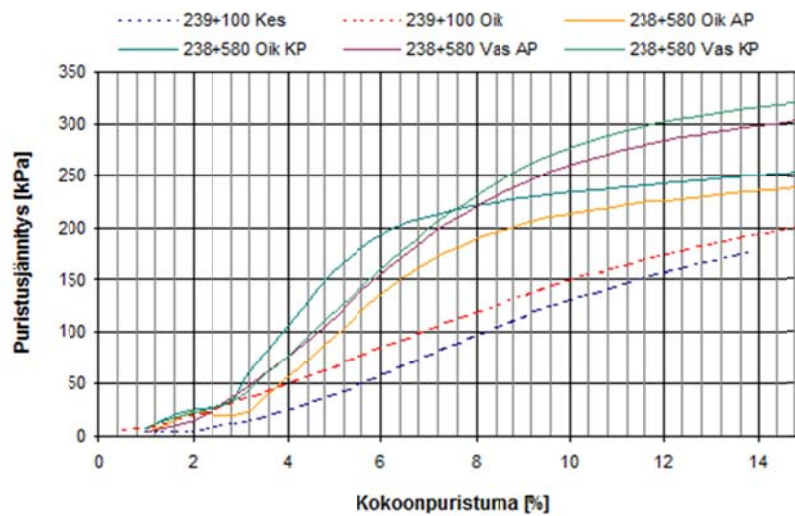


Kuva 5.25. Eri levytyypeille ominaiset jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeissa

(Nurmikolu & Kolisoja 2001).

Jos käytössä on tyypillinen 80 mm paksu routalevy, siitä aiheutuva palautuva painuma olisi 250 kN akselipainolla noin 0,24 mm. Lineaarisesti interpoloiden jäykkyyssmittauksissa käytetyllä 140 kN akselipainolla levyn kokoonpuristuma olisi keskimääräisellä jäykkyydellä (kokoonpuristuma 0,3 % routalevyn paksuudesta) arvioituna noin 0,14 mm. Vastaavasti 210 kN akselipainot omaava SR2 veturi aiheuttaisi noin 0,21 mm kokoonpuristuman. Edellä esitetty laskenta on hyvin suuntaa-antava, mutta joka tapauksessa XPS-routalevyjen vaikutus radan jäykkyyteen yksittäisenä komponenttina olisi havaittavissa.

Ennen XPS-materiaalieja routalevyinä on käytetty myös EPS-levyjä (Expanded Polystyrene). Nurmikolu & Kolisoja (2002) ovat tehneet puristuskokeita myös radassa olleille EPS-routalevyille (Kuva 5.26). Kokeiden mukaan EPS-levyjen kokoonpuristuma em. vaihteluvälillä olisi jopa 2–5 % levyn paksuudesta. Tästä aiheutuva palautuva painuma olisi siis kymmenkertainen XPS-routalevyihin verrattuna. Laskennallisesti tarkasteltuna EPS-levyt lisäävät palautuvaa painumaa jopa 2–3 mm. EPS-routalevytetyt kohdat pitäisikin näkyä selkeästi jäykkyyssmittauksissa.



Kuva 5.26. Radasta poistettujen EPS-routalevyjen kokoonpuristuma puristuskokeissa (Nurmikolu & Kolisoja 2002).

Lielähti–Ylöjärvi-liikennepaikkavälin mittauksissa suurimmat oletettavasti routalevyn aiheuttamat palautuvan painuman tasomuutokset olivat 0,3 mm. Tämän lisäksi routalevyjen alkamis- ja päättymiskohtiin on muodostunut geometriavirheitä ja roikkuvia pölkkyjä (ks. luku 3.37)

Routalevyt siis lisäävät rakenteen joustoa, vaikka liikennöitävyys lyhyellä aikavälillä routahaittojen poistumisen muodossa paraneekin. Jäykkyyden pieneneminen routalevyjenkin vaikutuksesta ainakin teoriassa myös vähentää rakenteen kuormituskestävyyttä. Routalevyjen turhaa käyttöä tulisi välttää ja routalevyjen aloitus- ja päättymiskohtiin tulisi rakentaa kunnolliset siirtymärakenteet esimerkiksi levypaksuutta vaihteittain kasvattamalla.

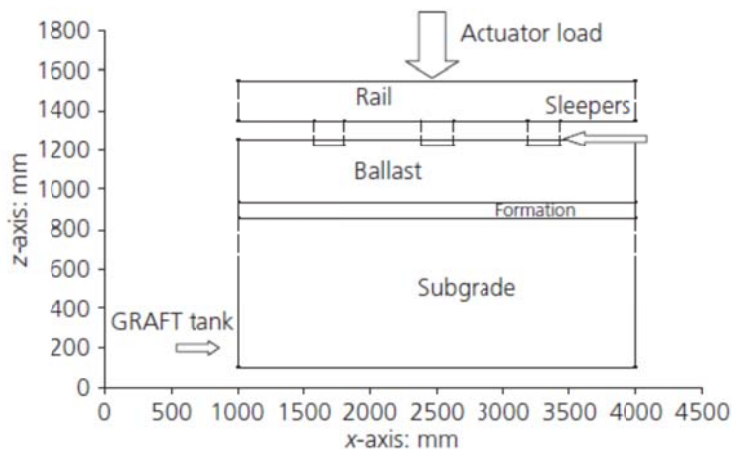
5.7 Ratapenkereen vahvistaminen

Tässä luvussa käsitellään pohjamaan ja ratapenkereen vaikutusta palautuviin painumiin ja radan kuormituskestävyyteen. Varsinaiset pohjamaan parantamiseen tähtäävät toimenpiteen rajattiin tämän työn ulkopuolelle, sillä pohjanvahvistusta tehdään yleensä muista syistä kuin jäykkyydenäkökulmasta.

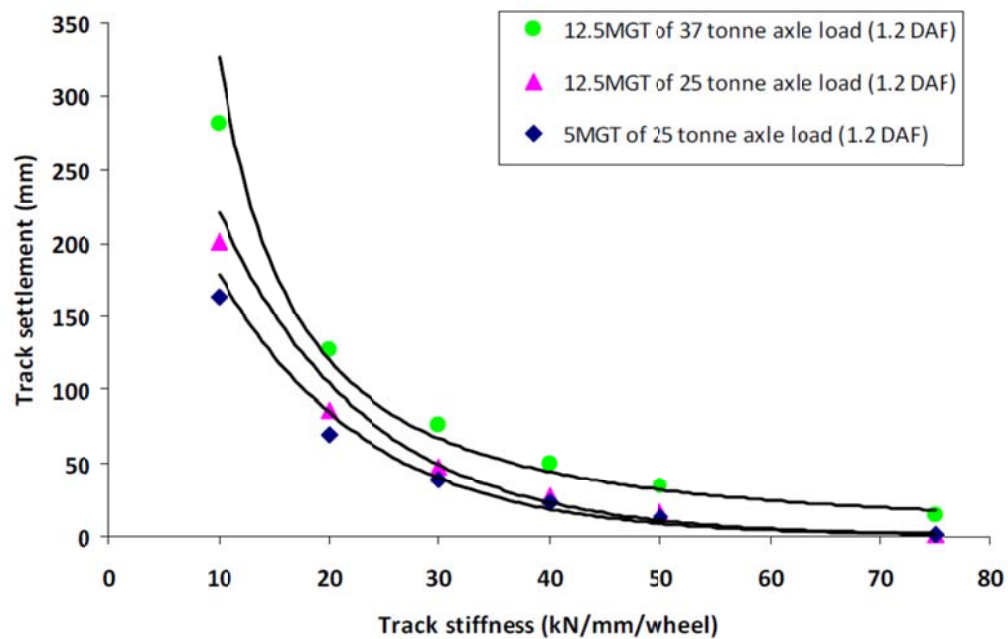
5.7.1 Pohjamaan vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin

Radan jäykkyys on yksi indikaattori, joka kuvastaa sitä miten hyvin ratapenger ja pohjamaa kestävät toistokuormituksia. Esimerkiksi pengerleveystutkimuksessa (Kalliainen & Kolisoja 2013) tultiin siihen tulokseen, että pohjamaan rooli on merkittävin ratapenkereen pysyvien muodonmuutosten syntymiseen vaikuttavista seikoista. Suuret palautuvat muodonmuutokset aiheuttavat sepeliin ja radan alusrakenteeseen suuria leikkausjännityksiä, jotka aiheuttavat edelleen myös suuria pysyviä muodonmuutoksia. Huomionarvoista tutkimuksessa oli se, että radan kuormituskestävyys olisi mitattavissa palautuvan painuman avulla. Tutkimuksen perusteella laadittiin ohjeet siitä miten, pengerleveys tulisi mitoittaa erilaisilla pohjamailla palautuvaan painumaan perustuen.

Vastaavia päätelmiä on tehnyt väitöskirjassaan myös Kennedy (2011). Hän mallinsi radan pysyviä muodonmuutoksia GRAFT -simulaattorin avulla. Koejärjestely koostui metallilaatikosta, jonka mitat olivat: leveys 1,072 m, pituus 3,0 m ja korkeus 1,15 m (Kuva 5.27). Maamateriaalien päällä oli kovapuiset ratapölkkyt ja kiskon taivutusvas-
tuksen omaava I-palkki. Junakuormaa simuloitiin dynaamisesti ohjatulla hydraulitun-
killa, joka sijaitsi keskimmäisen ratapölkyn kohdalla. Koetulosten perusteella määri-
tettiin yhteys penkereen pysyvien muodonmuutosten ja radan jäykkyyden välille. Ku-
van (Kuva 5.28) perusteella nähdään, että ratapenkereen pysyvät muodonmuutokset
kasuvat voimakkaasti radan jäykkyyden pienentyessä. Lähteen mukaan koetuloksia
ei voida suoraviivaisesti siirtää oikealle radalle pienen mittakaavan ja paikallaan py-
syvän kuormituksen takia, mutta tulokset kertovat ilmiöiden vaikutussuunnan. Myös
sepin hienoneminen on merkittävä pysyvien muodonmuutosten syntymiseen vai-
kuttava tekijä rakenteen ja pohjamaan muodonmuutosten ohella. Tässä tutkimukses-
sa näiden kahden asian vaikutusta ei kuitenkaan eroteltu.



Kuva 5.27. GRAFT-simulaattorin periaatekuva (Kennedy 2011).



Kuva 5.28. Radan jäykkyyden vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin GRAFT-simulaattorin koetulosten perusteella (Kennedy 2011).

Kennedyn käyttämässä koejärjestelyssä oli suomalaisen ratarakenteeseen verrattuna melko ohuet rakenteet, sillä 300 mm sepelin alla oli vain 70 mm välikerros ja tämän alla oli jo pehmeä 750 mm paksu pohjamaakerros, jonka jäykkyyttä varioitiin koeksissa (Kuva 5.27). Tulosten suora siirtäminen suomalaiseen rataympäristöön ei välttämättä toimi toivotulla tavalla, mutta tehdään tästä huolimatta laskuharjoitus, jossa oletetaan koetulosten pätevän myös meillä. SR2-veturin aiheuttama palautuva painuma on usein 0,6–1,2 mm kovilla pohjamailla ja palautuva painuma kasvaa sitä suuremmaksi mitä pehmeämmille pohjamailla mennään. Kovilla pohjilla voidaan ajatella kuorman alla olevalle pölkylle tulevaksi noin puolet akselikuormasta. Näin ollen 210 kN akselipainosta pyöräkuormaksi tulee 105 kN ja yhdelle pölkyn puoliskolle tästä puolet eli 52,5 kN. Normaali vaihteluväli radan jäykkyydelle voisi siten olla Kuvassa (Kuva 5.28) käytetyllä asteikolla noin 44–88 kN/mm/pyörä. Erittäin heikot pohjamaat, kuten turvepehmeiköt, aiheuttavat nekin yleensä alle 3 mm palautuvan painuman SR2-veturin kuormittamana. Pehmeiköllä kuorma jakautuu myös laajemmalle alueelle kiskon taivutusvastuksen seurauksena ja kuorman alla olevalle pölkylle voisi olettaa tulevan 40 % pyöräkuormasta. Näin laskien oltaisiin jäykkyydellä 14 kN/mm/pyörä. Toteutuvan jäykkyydellä avulla voidaan karkeasti arvioida miten erilaiset pohjamaat vaikuttavat pysyviin muodonmuutoksiin kuvan (Kuva 5.28) mukaisesti. Pehmeikkö aiheuttaisi 12,5 MGT:n kuormitusmäärällä ja 25 tonnin akseleilla noin 160 mm kumulatiivisen penkereestä aiheutuvan pysyvän muodonmuutoksen. Ns. normaali jäykkyyden vaihteluväli (44–88 kN/mm/pyörä) aiheuttaisi kyseisellä kuormituksella noin 0–20 mm pysyvät muodonmuutokset. Laskentatulokset lienevät ainakin suuruusluokaltaan järkeviä.

Radan jäykkyyden rooli on siis hyvin merkittävä pysyvien muodonmuutosten syntymisessä. Penkereen ja pohjamaankin vahvistaminen on perusteltua, jos sillä saavutetaan merkittävää etua radan käyttöikänsä tai liikennöitävyyteen. Pienikin parannus radan jäykkyydessä vähentäisi merkittävästi pysyviä muodonmuutoksia etenkin pehmeiköillä, missä muodonmuutostaso on lähtökohtaisesti suuri. Penkereeseen ja poh-

jamaahan kohdistuvat toimenpiteet tulevat tämän tiedon valossa houkutteleviksi myös kuormituskestävyysnäkökulmasta.

5.7.2 Alusrakenteen ja pohjamaan parantaminen

Suomalaisessa ratarakenteessa on pääsääntöisesti 0,55 m tukikerroksen alapuolella vähintään 300 mm paksuinen välikerros ja joitakin poikkeustapauksia lukuun ottamatta sen alla vielä melko paksu sorasta tai hiekasta rakennettu eristyskerros. Ratojen syntyhistoriasta johtuen eristyskerroksen paksuus vaihtelee melkoisesti eri paikoissa ja eri aikakausina rakennetuissa radoissa, mutta pääsääntöisesti rakennettujen kerrosten kokonaispaksuus on vähintään 1 metri, usein jopa yli 1,5 metriä. 1960-luvulla voimaan tulleiden ohjeiden mukaan pengertäytteenä tuli käyttää routimatonta materiaalia 1,2–1,8 metrin syvyyteen saakka, mutta valtaosa radoistamme on rakennettu jo ennen tätä aikakautta. Uusien ratojen routamitoitus johtaa yli 2 metrin rakennekerrospaksuuksiin, mutta uusia ratoja rakennetaan vain vähän ja näin paksut rakenteet yleistyvät hitaasti. Eristyskerroksen hiekka on monissa tapauksissa ajettu rataa hevosten avulla tai pienillä kuorma-autoilla eikä sitä ole siksi haettu kovin kaukaa. Käytetyt materiaalit vaihtelivat saatavuuden takia melkoisesti. Tämän lisäksi lukuisissa perusparannuksissa penkereitä on korotettu ja levennetty ja vanhat materiaalit ovat penkereissä välillä keskellä pengertä ja toisinaan penkereen reunalla. (Saarinen 2008)

Vanhojen ratojen alusrakenteiden syntyhistorian aiheuttaman epämääräisyyden takia aina ei voida olla varmoja siitä, että rakennetut kerrokset täyttävät nykyiset rakenteilta odotetut vaatimukset. Esimerkiksi alusrakenteessa käytettävä hiekka voi olla lievästi routivaa ja rakenne kerää itseensä vettä routimisen seurauksena. Keväällä routan sulaessa saattaa syntyä muutaman viikon kestävä kelirikko, kun ylimääräinen sulava vesi ei pääse kunnolla pois rakenteesta ja aiheuttaa kuormituskestävyyden romahtamisen. Olemassa olevan alusrakenteen ominaisuuksia on lähtökohtaisesti kovin hankala muokata. Alusrakenteen materiaaleja olisi mahdollista parantaa lisäämällä niihin sopivaa lisäainetta, joka parantaa materiaalin kuormituskestävyyttä ja/tai tekee siitä routimatonta. Tällainen alusrakenteen stabilointi olisi mahdollista sepelin seulonnan yhteydessä, jos sepelin lisäksi käsittelyyn otettaisiin myös alapuolisia kerroksia.

Plasser & Theurer on kehittänyt sepelin puhdistukseen tarkoitettuja laitteita, joilla voidaan käsitellä myös tukikerroksen alapuolisia rakenteita. Formation Rehabilitation Machine (radanparannuskone) on laite, jolla voidaan kaivaa tukikerros ja välikerros ja ehkä hieman eristyskerrostakin seuloille ilman että raidetta tarvitsee purkaa. Tukikerros seulotaan ja pestään ja jäljelle jäänyttä materiaalia käytetään alapuolisten kerrosten parantamiseen. Samalla materiaaleihin voidaan lisätä uutta kiviainesta ja todennäköisesti aika pienin muutoksin sideainettakin. Kuvassa (Kuva 5.29) on esitetty PM 1000 URM laite, joka rakentaa kolmea eri kerrosta olemassa olevaan rataa. Alimmaisiksi asennetaan samalla kertaa geotekstiili, tämän päälle eristyskerros ja välikerros. Tukikerroksen rakentaminen tapahtuu hieman kuvan ulkopuolella. (Plasser & Theurer 2013)



Kuva 5.29. Radanrakennuskone, jolla voidaan parantaa ratarakennetta myös tukikerroksen alapuolelta (Plasser & Theurer 2013).

Radanparannuskoneen tavoitteena on lisätä homogenisoitu ja tiivistetty muodonmuutoksia rajoittava kerros tukikerroksen alapuolelle, ja menettelyn päätarkoitus on lisätä radan alusrakenteen kuormituskestävyyttä. Radanparannuskoneen etuja ovat Beczkowskin (2002) mukaan:

- työ voidaan tehdä purkamatta raidetta
- uusia rakennekerroksia voidaan rakentaa olemassa olevista materiaaleista
- kuljetuskustannuksia säästyy, sillä sepeliä ei tarvitse kuljettaa pois ja uutta materiaalia tarvitaan vähemmän
- kumipyöräkuljetuksia tai niiden edellyttämiä kulkuyhteyksiä ei tarvita
- työ ei vaikuta viereiseen raiteeseen, jolla voidaan liikennöidä normaalisti
- laite pystyy työskentelemään ATUn sisällä
- uusi välikerros pystytään lisäämään samalla, kun käyttökelvoton sepeli voidaan hyödyntää eristyskerroksen yläosassa
- geotekstiili, geoverkko tai routalevyt voidaan asentaa samalla kertaa
- työmaalla ei tarvita varastokasoja tai erillisiä tuotantolaitoksia materiaalien valmistukseen
- suuri työsaavutus - jopa 80 m/h.

Radanparannuskone on suunniteltu keskieurooppalaisille ratarakenteille, joissa tukikerroksen alapuolella on vain ohut alusrakenne tai sitä ei ole lainkaan. Radanparannuskoneen avulla pystytään lisäämään ja homogenisoimaan rakennekerros tukikerroksen alapuolelle. Olettamana on, että tukikerroksen seulontajäte voidaan hyödyntää alusrakenteessa ja että tästä materiaalista saadaan rakennettua aina parempilaatuista materiaalia kuin mitä pohjamaa tai mahdollinen olemassa ollut alusrakenne alun perin oli. Suomessa tämä ajatteluketju ei toimi välttämättä aivan yhtä selkeästi, sillä useimmilla radoilla on jo entuudestaan rakennettuja kerroksia kohtalaisen paksuusti. Käyttämällä tukikerroksen seulontajäte alusrakenteen pinnalla sellaisenaan, saatetaan saada aikaiseksi voimakkaasti vettä pidättävä ja routivakin rakennekerros, josta voi olla enemmän haittaa kuin hyötyä. Sekoittamalla seulontajätteeseen sopiva määrä kiviainesta tai vaikkapa pieni määrä sementtiä, voitaisiin kenties rakentaa erittäin jäykkä ja kuormituskestävyyttä aidosti lisäävä rakennekerros. On syytä kuitenkin varmistua siitä, että rakennekerrosten laatu paranee pintaa kohden tultaessa. Esimerkiksi tierakenteita on joskus parannettu lisäämällä uusi kantava kerros ja asfaltti van-

han päällysteen päälle. Kyseisen laskennallisesti erittäin hyvän kuormituskestävyyden saavuttavan rakenteen kompastuskiveksi tulee hieman yllättäen kuivatus, sillä kahden melko tiiviin päällystekerroksen väliin päätyvä vesi romahduttaa uuden kantavan kerroksen kuormituskestävyyden. Vesi ei pääse poistumaan kunnolla ja uusi päällyste rikkoutuu hyvin nopeasti.

Radan kuormituskestävyyden lisääminen uusia kerroksia rakentamalla ei välttämättä näy kovinkaan paljon palautuvan painuman arvossa. Todennäköisesti jäykkyysvaihtelut pienenevät, kun rakennekerrokset homogenisoituvat ja tuentalilanne paranee. Karkeasti haarukoiden välikerroksen ja alusrakenteen yläosan jäykkyysmoduulin kasvassa esimerkiksi alkuperäisestä 50 MPa:sta kaksinkertaiseksi 100 MPa:iin, saavutetaan näissä kerroksissa noin 0,25 mm palautuvan painuman pieneneminen. Tämän lisäksi alapuolisten rakenteiden jännitystaso laskee ja muodonmuutokset pienenevät, minkä seurauksena palautuva painuma pienenee kokonaisuudessaan ehkä hieman enemmän. Oletuksena laskelmassa oli, että parannetun kerroksen paksuus on 0,5 m ja sen keskimääräinen jännitystaso 50 kPa. Useimmissa tapauksissa ainakin välikerroksen jäykkyysmoduuli saattaa olla jo entuudestaan selvästi suurempi eikä sitä voida homogenisoimalla tai uuden materiaaliin lisäämiselläkään merkittävästi parantaa. Eristyskerroksen yläosan parantaminen saattaisi kuormituskestävyyttä sen sijaan lisätä, sillä eristyskerroksissa käytetyt hiekat voivat olla erittäin hienorakeisia ja jäykkyysmoduulit alhaisia.

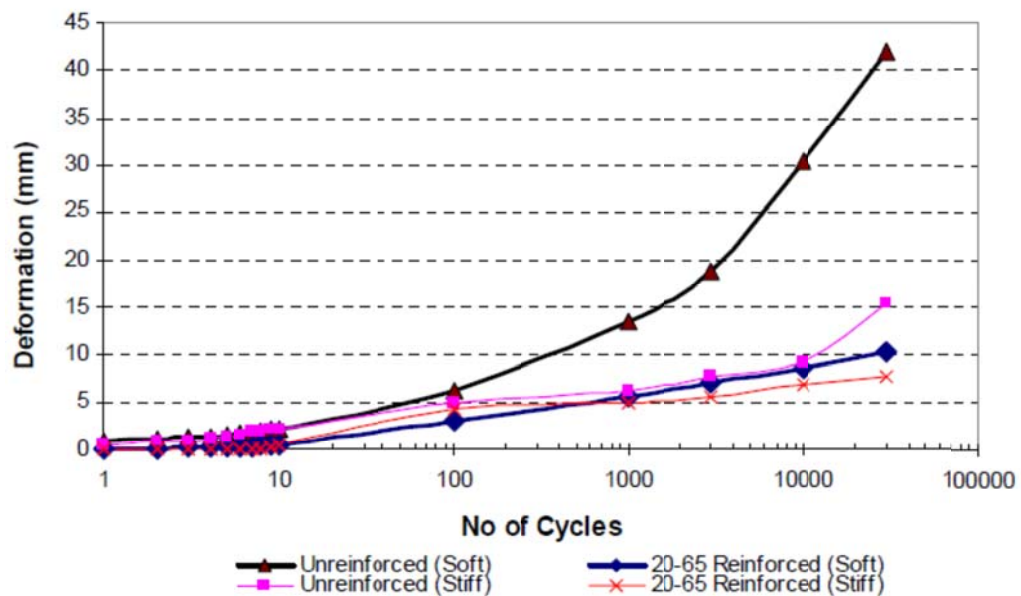
Edellä kuvattu menetelmä on käytännössä järkein menetelmä mitä voidaan käyttää ottamatta raidetta kokonaan pois liikenteeltä. Tätä järeämmät operaatiot, kuten raitteen alle kohdistuvat stabiloinnit, massanvaihdot ja paalulaattojen rakentamiset, vaativat yksiraiteisella rataverkolla liikenteen totaali katkon. Liikennehaitan vähentämiseksi ja rakentamisen jouduttamiseksi olisi tällaisissa tapauksissa usein järkevämpää rakentaa kokonaan uusi raide tai rata, ja vieläpä niin etäälle, että rakentaminen ei häiritse olemassa olevaa liikennöityä rataa.

5.7.3 Geolujitteet

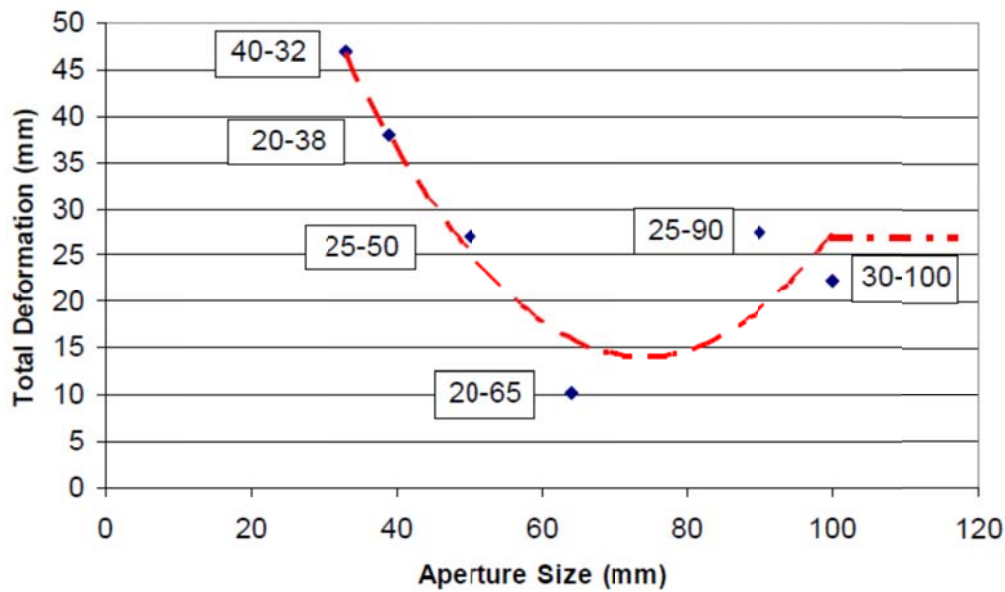
Geolujitteilla tarkoitetaan synteettisistä polymeereista jatkojalostamalla valmistettuja kudoksia (kankaita), verkkoja sekä liuskoja ja liuskoista yhteen liittämällä valmistettuja verkkomaisia punottuja rakenteita sekä teräksisiä verkkoja. Geolujitteilla tavoitellaan yleensä luiskien vakavuuden lisäämistä tai tilansäästöä jyrkempien luiskien muodossa, kantavuuden lisäämistä pehmeikkörakentamisessa tai muuten kelpaamattomien maamassojen hyödyntämistä. Geolujitteen toiminta perustuu maamateriaalin ja lujitteen väliseen tartuntaan joko kitkan tai lukkiutumisen muodossa ja geolujitteen tehtävänä on ottaa vastaan rakenteeseen kohdistuvat vetokuormitukset, sillä maamateriaalit eivät yleisesti ottaen kestä pitkäaikaista vetorasitusta. (Liikennevirasto 2012)

Geolujitteiden hyödyllisyys on helposti nähtävissä stabiilimpien luiskien ja tilansäästön muodossa, mutta niiden hyöty ratapenkereen toiminnassa on hankalammin osoitettavissa. Geoverkkovalmistaja Tensarin esitteiden mukaan (Tensar 2013) geoverkko voidaan asentaa joko välikerroksen alle ja/tai tukikerroksen alle. Molemmissa käyttökohteissaan verkko lisää vaakasuuntaisten muodonmuutosten vastustuskykyä, sillä verkko ottaa vastaan vetorasituksia. Tensar kertoo geoverkon jäykistävän ratarakennetta myös pystysuunnassa ja pidentävän tuentavälin 3–5-kertaiseksi lujittamattomaan rakenteeseen verrattuna. Geoverkon avulla voitaisiin myös pienentää rakennekerrospaksuuksia, mutta suomalaisen routamitoituksen näkökulmasta tämä vaihtoehto ei tule käytännössä kysymykseen.

Kwan on tutkinut väitöskirjassaan (Kwan 2006) geoverkolla vahvistettua tukikerrosta. Pienen mittakaavan laboratoriokokeissa hän sai tulokseksi, että tukikerroksen alle asennettu geoverkko pienentää merkittävästi pysyviä muodonmuutoksia pehmeälle pohjamaalle rakennetussa ratapenkereessä ja jonkin verran myös jäykälle pohjamaalle rakennetussa penkereessä (Kuva 5.30). Toinen merkittävä havainto oli se, että geoverkon vetolujuudella ei ollut niin suurta vaikutusta koetuloksiin kuin verkon muodolla. Verkon silmäkoon on oltava riittävän suuri, jotta sepelin lukkiutuminen verkkoon tapahtuu kunnolla (Kuva 5.31). Toisaalta silmäkoon kasvattaminen kaksinkertaiseksi raekokoon verrattuna ei tuonut testituloksiin parannusta, vaan optimisilmäkkö oli suunnilleen 1,5 x suurin raekoko. Testeissä käytetty sepeli oli rakeisuudeltaan 31,5–50 mm. Lujitemuoviverkon muuttaminen teräksiseen ei sekään tuonut kovin suurta muutosta perusilmiöön, mutta teräsverkolla saavutettiin hieman pienemmät pysyvät muodonmuutokset kuin Tensar-lujiteverkolla.

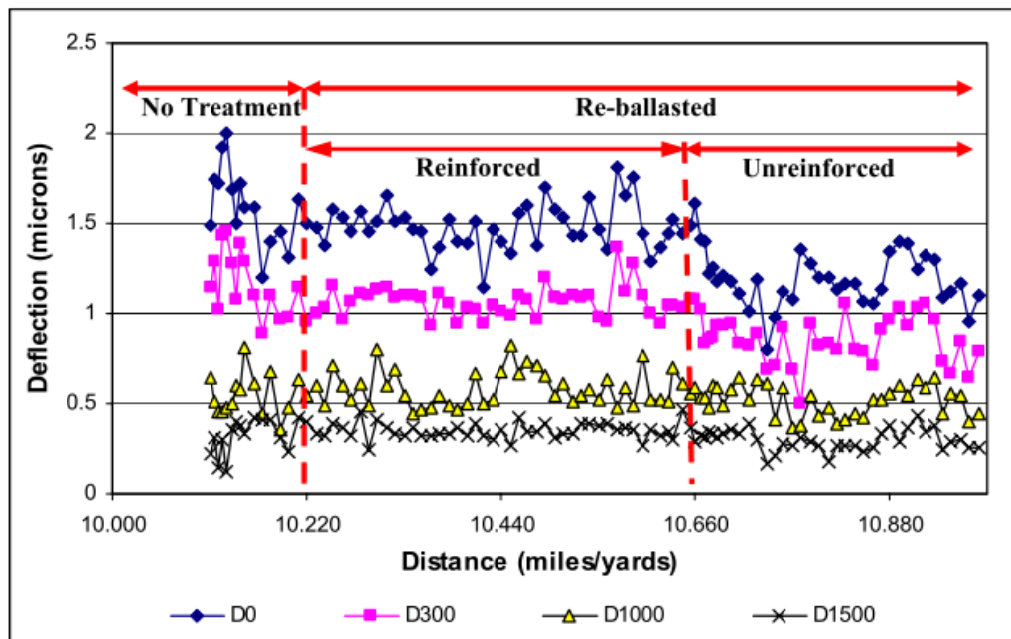


Kuva 5.30. Pienen mittakaavan laboratoriokoetulokset ratapenkereen kuormituskokeista, joissa osassa rakenteista oli asennettuna Tensar geoverkko. (Kwan 2006)



Kuva 5.31. Geoverkon silmäkoon vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin pehmeällä pohjamaalla tehdyissä laboratoriokokeissa 30000 syklin jälkeen. Kuvassa laatikoissa olevat lukuarvot, esim. 40–32, tarkoittavat verkon silmäkokoja millimetreissä. (Kwan 2006)

Geoverkoista on siis Kwanin tutkimusten valossa selkeää etua pysyvien muodonmuutosten hallinnassa etenkin pehmeillä pohjamailla. Geoverkon vaikutus palautuviin painumiin ei ole yhtä selkeä, sillä vaikutus saattaa olla jopa negatiivinen, kuten Kuva 5.32 osoittaa. Geoverkko saattaa hankaloittaa tiivistystyötä eikä rakennetta saada tiivistettyä yhtä tiiviiksi kuin ilman verkkoa. Tästä syystä palautuva painuma saattaa kasvaa geoverkotetussa rakenteessa, vaikka kuormituskestävyys sinällään paranisi-kin. Tällainen yksityiskohta sopii tietenkin huonosti edellä esitettyyn ajattelumalliin, jossa radan kuormituskestävyys kasvaa radan jäykkyyden kasvaessa.



Kuva 5.32. Pudotuspainolaitteen mittaustulokset Coppul Moorista radan parannuksen jälkeen. Kuvassa D0 tarkoittaa taipumaa pudotuspainolaitteen kuormituslevyn keskellä, D300 taipumaa 300 mm etäisyydellä keskipisteestä, jne. (Kwan 2006)

5.7.4 Siltpäädyt

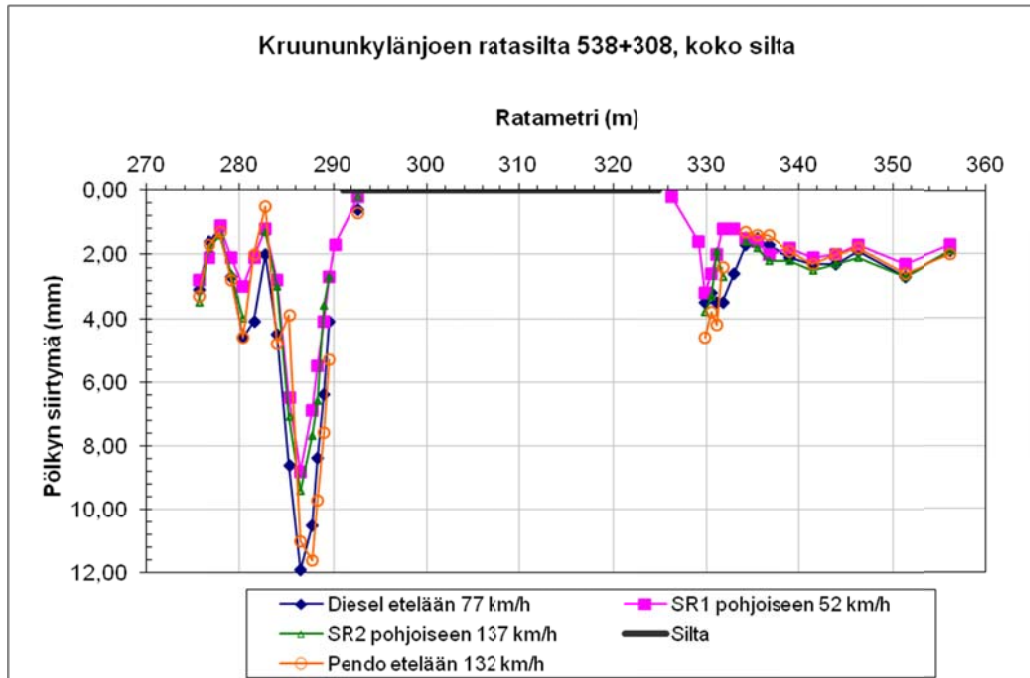
Sillat muodostavat rataa aina jonkinasteisen epäjatkuvuuskohdan verrattuna ratapenkereeseen. Betonista valmistetut sillat ovat hyvin jäykkiä ja usein perustettu paa-luille. Betonisilta on varsinkin perustusten kohdalta lähes liikkumaton, mutta tulopenkereissä tapahtuu aina pientä liikennekuormasta aiheutuvaa muodonmuutosta. Betonisilloille on tästä syystä rakennettu tukikerros, joka tasaa sillasta aiheutuvaa jäykkyyseroa ja mahdollistaa yhtäjaksoisen tuennan penkereeltä sillalle. Silloista aiheutuu toistuvaa kunnossapidotarvetta, sillä silta pysyy paikoillaan, mutta ratapenger sillan molemmilla puolilla painuu ja levenee liikennekuormituksen ja toisinaan myös pohjamaan konsolidaation takia. Painuminen voi aiheutua myös muista pohjamaan muodonmuutoksista tai heikosta pengermateriaalien tiivistämisestä, mutta yleisemmin kyseessä on tukikerroksen hienontumiseen ja penkereen leviämiseen liittyvä korkeusviivan lasku. Routahavaintoasemien mittaustulosten mukaan raiteen korkeusasema laskee routimattomissa kohteissa 2–4 mm vuodessa ja routivissa kohteissa selvästi enemmän, jopa 10 mm vuodessa (Metsovuori 2013). Korkeusaseman lasku routimattomissa kohteissa syntyy tukikerroksen hienonemisesta ja osin ratapengeren levenemisestä. Sen sijaan routivien kohteiden osalta kyseessä on roudan sulamiseen liittyvä sulamispehmeneminen, joka aiheuttaa kuormituskestävyyden heikkenemisen ja suuremman pysyvien muodonmuutosten syntymisen kevätaikaan.

Penkereen ja sillan korkeusasemaero yleensä siis kasvaa liikennemäärän suhteessa ajan kuluessa. Tilannetta voidaan pitää yllä säännöllisellä kunnossapidolla, mikä on kohtalaisen helposti hoidettavissa tuennalla tukikerroksella varustettujen betonisiltojen osalta. Myös sillalla oleva tukikerros hienontuu liikennekuormituksen vaikutuksesta ja se tasaa painumaeroa sillan ja penkereen välillä. Kunnossapito on paljon hankalampaa tukikerroksettomien siltojen osalta. Tällaisia siltoja ovat tyypillisesti teräksiset sillat, joissa puiset ratapölkkyt ovat kiinnitettyinä suoraan teräsrakenteisiin. Tukikerroksettomien siltojen päätyjen tuenta on vaikeaa, sillä tuentaa ei voida tehdä koneellisesti aivan siltpäätyyn saakka, ainakaan mikäli kiskonkiinnityksiä sillalla ei irroteta. Tuenta ei ole kunnolla toteutettavissa, koska kiskoja ei voida nostaa siltpäädyssä, sillä ne ovat kiinteästi kiinnitettyinä siltarakenteisiin. Myös suojakiskot tuovat oman haasteensa tuentaan, mutta toisaalta ne jäykistävät raidetta ja tasaavat jäykkyyseroa sillan ja penkereen välillä.

Tutkimuksissa on esitetty hieman toisistaan poikkeavia arvioita siitä, miten iso rooli jäykkyyden muuttumisella siltpäädyssä on liikkuvan kaluston kulkuun ja penkereen muodonmuutoksiin. Esimerkiksi lähteen Banimahd et al. (2011) mukaan jäykkyyden muuttuminen itsessään ei ole ensisijainen suunnittelua vaativa asia siltpäädyissä, jos kyseessä ei ole suurnopeusrata. Sen sijaan tyhjätilan muodostuminen ratapölkkyjen alle kiihdyttää raidegeometrian heikkenemistä samalla, kun tästä aiheutuvat liikkuvan kaluston dynaamiset kuormitukset kiihdyttävät ilmiötä entisestään. Lähteessä kehoitetaan suunnittelemaan siirtymärakenteet ennemmin pysyvien muodonmuutosten ehkäisemisen kannalta kuin varta vasten jäykkyyserojen tasoittamisen näkökulmasta.

Useimmiten sillat eivät näy kovin voimakkaasti jäykkyysmittauksissa, mikä on tietenkin toivottava tilanne. Jos silta havaitaan mittauksissa, jäykkyyspoikkeama näkyy yleensä siten, että palautuva painuma sillan päädyissä on selvästi muuta rataa suurempi. Vain harvoin sillan kansi on merkittävästi muuta rataa jäykempi tai ainakin jäykkyysero on päätyilmiöihin verrattuna hyvin pieni. Kuvassa (Kuva 5.33) on esitetty suurimmat mitatut palautuvan painuman mittaustulokset TTY:n mittaamisissa silta-

päädyssä. Mittaustulokset ovat Kruununkylänjoen ratasillalta vuodelta 2009. Sillan eteläpäädyssä pölkyt roikkuivat ilmassa noin 7–8 metrin matkalta (Kuva 5.34). Kohde on sittemmin parannettu asentamalla siltäpäätyyn kaukalopalkit, paalut ja siirtymälaatta.

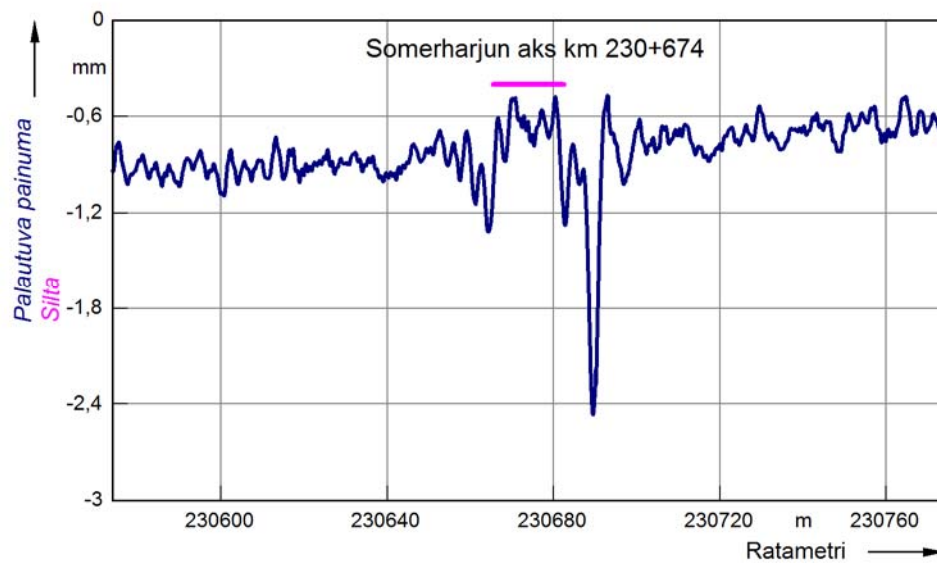


Kuva 5.33. Palautuvan painuman mittaustulokset Kruununkylänjoen ratasillalta vuodelta 2009. Mittaus on tehty kiihtyvyyssantureilla ratapölkyn päästä.



Kuva 5.34. Kruununkylänjoen ratasilta kuvattuna sillan eteläpuolelta pohjoiseen. Sillan eteläpäädyssä on vaihde kohtalaisen lähellä siltaa.

Useimmiten siltapäädyt eivät tietenkään näy edellä kuvatulla tavalla vaan sillan vaikutus on merkittävästi vähäisempi. Joitakin tällaisia esimerkkejä löytyy luvusta 3. Kuvassa (Kuva 5.35) on esitetty jatkuvatoimisen jäykkyysmittauksen tulokset Somerharjun alikulkusillan kohdalta (km 230+674) Kaitjärvi-Taavetti-liikennepaikkaväliltä. Mittaus on tehty 3.9.2013. Kuvaajassa näkyy selvästi suurentunut palautuva painuma molemmissa, mutta etenkin idän puoleisessa siltapäädyssä. Huomionarvoista on se, että palautuva painuma on suurentunut pitkältä matkalta siltapäädystä. Oletettavasti sillan molemmissa päissä on siirtymälaatat, mutta palautuva painuma onkin suurimmillaan vasta siirtymälaatan jälkeen (Kuva 5.36). Tässä esimerkissä palautuva painuma on siltakannella hieman keskimääräistä pienempi.



Kuva 5.35. Palautuvan painuman mittaustulos Somerharjun alikulkusillalta 3.9.2013.



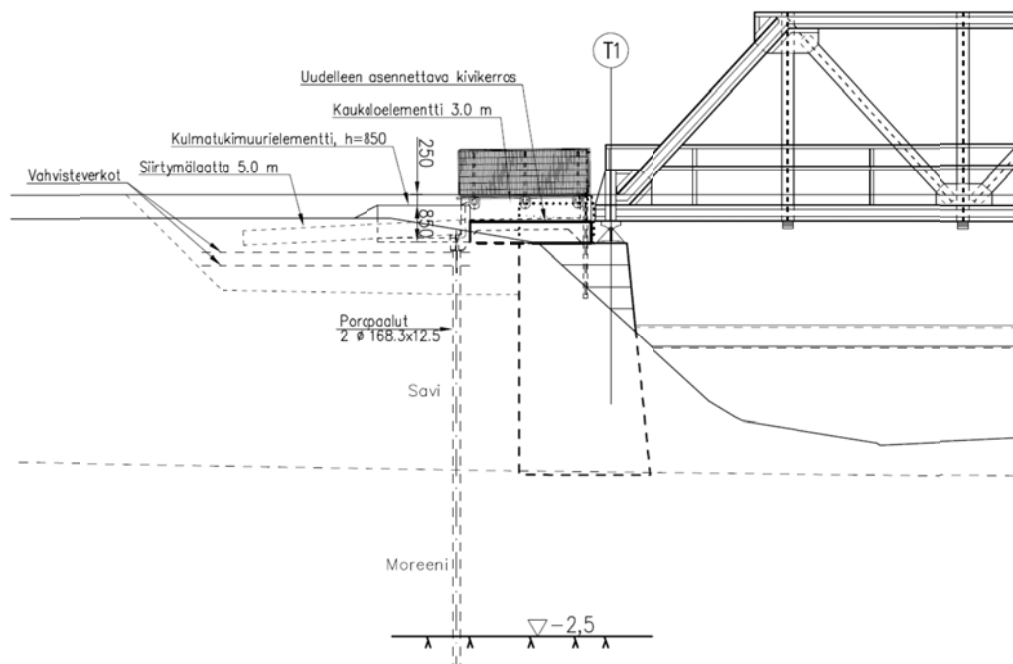
Kuva 5.36. Videokaappauskuva jäykkyysmittauksesta Somerharjun ratasillalta. Suurin palautuva painuma mitattiin kuvassa takimmaisena pyöränä kohdalta noin 7 metriä siltapäädystä itään.

Aikaisemmilla vuosikymmenillä useat sillat rakennettiin ilman varsinaista siirtymärakennetta sillan ja penkereen välille. Tällaisten siltojen kunnossapitotarvetta on yritetty myöhemmin vähentää rakentamalla siirtymälaattoja siltapätyihin. Ajatuksena on, että siltapädyssä oleva jäykkyysero tasataan siirtymälaatan matkalla. Toisaalta siirtymälaatta pienentää penkereen pysyvistä muodonmuutoksista aiheutuvaa korkeuspoikkeamaa.

Siirtymälaatan vaikutusta tutkittiin yhteistyössä VR Track Oy:n kanssa Seinäjoki-Kokkola-rataosalla kolmelta sillalta. TTY:n rooli tutkimuksessa oli lähinnä palautuvan painuman mittaaminen eivätkä muut tekniset yksityiskohdat esimerkiksi rakentamiseen ja kunnossapitoon liittyen ole kirjoittajien tiedossa. Mittaukset toteutettiin ennen rakentamistoimia vuonna 2009 ja toistettiin parantamisen jälkeen vuonna 2011. Ähtävänjoen ratasillan osalta ensimmäiset mittaukset toistettiin pari kuukautta myöhemmin uusien mittausantureiden testaamista varten. Tavoitteena mittauksissa oli, että mittaukset tehtiin juuri samoista ratapölkyistä ja samoilta ratametreiltä ennen ja jälkeen toimenpiteiden. Mittausten välissä siltapätyihin oli tehty taulukossa (Taulukko 5.7) esitetyt parannukset. Kuvassa (Kuva 5.37) on esitetty Ähtävänjoen ratasillan pätyihin suunnitellut parantamistoimenpiteet.

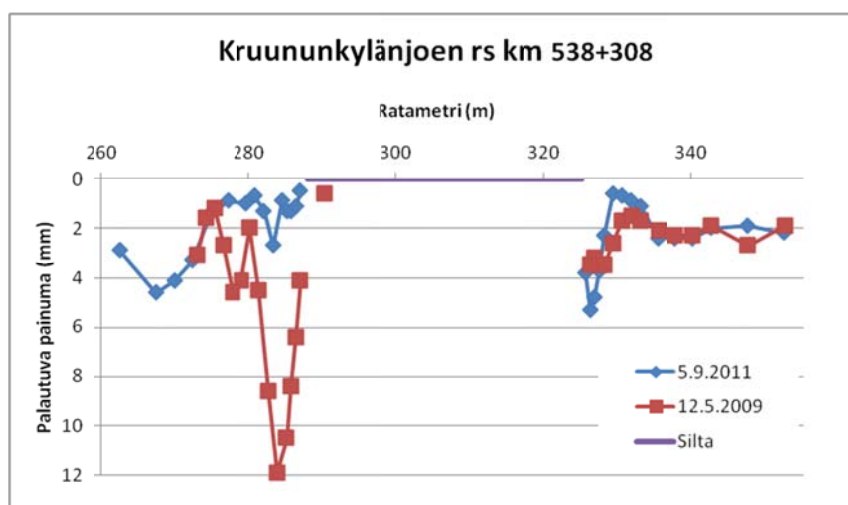
Taulukko 5.7. Siltapätyihin tehtyjä siirtymärakenteita.

Silta	Siirtymälaatat	Kaukalopalkki	Kulmatukimuurit	Teräsverk-kovahvistus
Kruununkylänjoen ratasilta km 538+308	Asennettu eteläpätyyn	Asennettu eteläpätyyn	Asennettu molempiin pätyihin	Asennettu pohjoispätyyn
Ähtävänjoen rata-silta km 524+675	Asennettu molempiin pätyihin	Asennettu molempiin pätyihin	Asennettu molempiin pätyihin	-
Kolpin alikulkusilta km 524+757	Olivat entuudestaan	-	Asennettu molempiin pätyihin	-



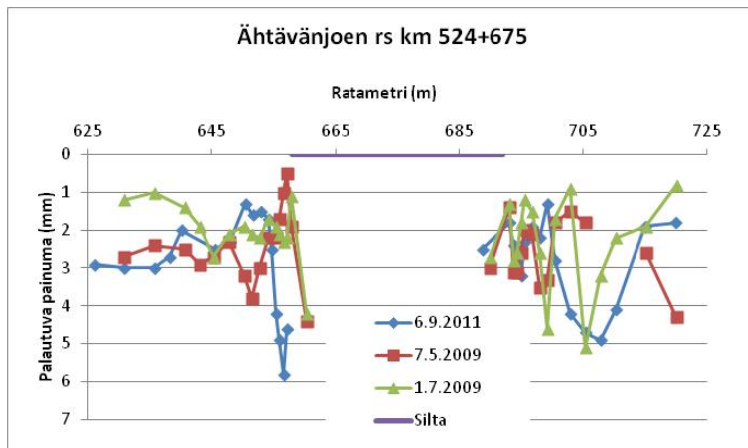
Kuva 5.37. Ähtävänjoen ratasillan eteläpäätyyn suunnitellut parantamistoimenpiteet.

Parantamistoimenpiteiden vaikutusta arvioitiin vertaamalla ennen ja jälkeen tehtyjä palautuvan painuman mittaustuloksia toisiinsa. Kruununkylänjoen ratasillan eteläpäätyyn tehtiin suhteellisen massiivinen siirtymärakenne, jossa sillan päätyyn asennettiin ensiksi kolme metriä pitkä kaukalopalkki elementti, joka tukeutui sillan maatukeen ja toisesta päästä porapaaluihin. Tästä eteenpäin asennettiin viisi metriä pitkä siirtymälaatta. Tämä siirtymärakenne näyttäisi tuottaneen toivotun lopputuloksen ja palautuva painuma pieneni merkittävästi (Kuva 5.38). Sen sijaan pohjoispäätyyn tehty teräsverkkoihin perustuva ratkaisu näyttäisi ainakin lyhyellä aikavälillä toimineen hieman huonommin, sillä palautuva painuma oli aivan sillan välittömässä läheisyydessä jopa vähän kasvanut.



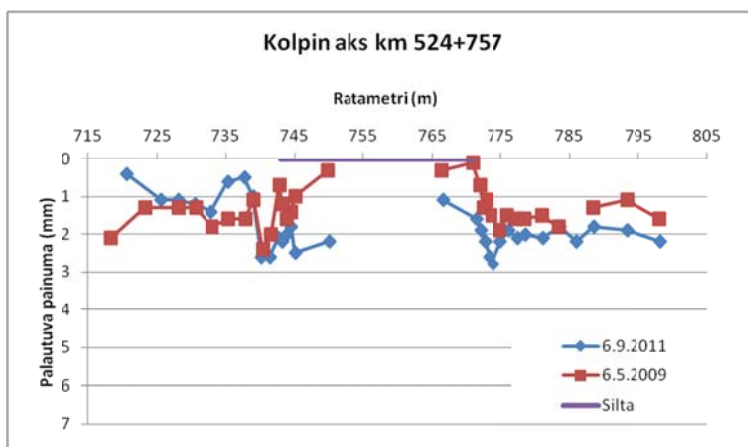
Kuva 5.38. Kruununkylänjoen ratasillan palautuvan painuman mittaustulokset ennen ja jälkeen parantamistoimenpiteitä.

Ähtävänjoen ratasillan mittaustulosten mukaan palautuva painuma oli jopa selvästi kasvanut eteläpäädyssä, mutta pysynyt ennallaan pohjoispäädyssä (Kuva 5.39). Molempiin pätyihin oli tehty järeät vahvistukset. Eteläpäädyn mittaustuloksissa ihmettyttää myös se, miksi suuri palautuva painuma tuli lähemmäksi sillan pätyä kuin missä se oli ennen toimenpiteitä. Oletettavasti tuentatilanne vain oli jälkimmäisen mittauksen aikaan heikko ja ongelma poistuisi huolellisella tuennalla suojakiskojen kohdalta. Toinen merkittävä havainto koskee pohjoispäätä, jossa suuri palautuva painuma on syntynyt aikaisempaa laajempaan noin 10–20 metrin päähän sillan päädyistä. Tämä voisi indikoida sitä, että helposti geometriaansa menettävä kohta olisi siirtynyt siirtymälaatan päähän. Tosin tämän kohteen osalta mittaustuloksissa on tavallista enemmän hajontaa, jota ei voida täysin selittää.



Kuva 5.39. Ähtävänjoen ratasillan palautuvan painuman mittaustulokset ennen ja jälkeen parantamistoimenpiteitä.

Kolpin alikulkusillan tapauksessa ei havaittu suurta muutosta suuntaan tai toiseen (Kuva 5.40). Pienoinen kasvu palautuvassa painumassa sillan pohjoispäässä lienee normaalia vaihtelua.



Kuva 5.40. Kolpin alikäytävän palautuvan painuman mittaustulokset ennen ja jälkeen parantamistoimenpiteitä.

Yhteenvedona näistä mittaushavainnoista voidaan todeta, että tilanne siltapäädysissä ei ole suinkaan stabiili ja että tuentatilanne muuttuu merkittävästi mittausten välillä. Sillat aiheuttavat rataa epäjatkuvuuskohdan, jonka läheisyydessä tuentatilanne todennäköisesti heikkenee ja ilman kunnossapitoa osa ratapölkyistä alkaa roikkua ilmassa. Tukikerroksellisilla silloilla siirtymälaattojen lisäämisen pitäisi vähentää kunnossapitotarvetta merkittävästi. Rakentamalla siirtymälaatat, kunnossapito-ongelmat eivät kuitenkaan ainakaan lyhyellä aikavälillä poistu kokonaan. Siirtymälaattojen lisäämisen jälkeen on todennäköistä, että siltapäätty vaatii tuentaa tihentyneesti, jotta rakentamisen vaikutus poistuu ja tietty stabiilius saavutetaan. Oletettavasti tilanne rauhoittuu muutaman vuoden kuluessa siirtymälaattojen lisäämisestä. Tukikerroksettomilla silloilla siirtymälaatta yksistään ei ole yhtä tehokas ratkaisu, sillä korkeusviiva laskee joka tapauksessa sepelin hienonemisen seurauksena. Tukikerroksettomiin siltojen tapauksessa säännöllinen tuenta lienee välttämätöntä, ellei tukikerroksen hienonemista ja penkereen muodonmuutoksia saada jollakin muulla tavalla loppumaan.

5.7.5 XiTRACK

XiTrack on geokomposiitti, jonka tavoitteena on parantaa radan ja etenkin raide-sepelin kuormituskestävyyttä. Tuote on asennusvaiheessa nestemäistä polymeeriä, jota valutetaan sepelin sekaan (Kuva 5.41). Polymeeri sitoutuu nopeasti ja sitoutumisen jälkeenkin tuote on joustavaa ja kestävä. Polymeeri on koostumukseltaan polyuretaania, jota valmistetaan kahdesta toisiinsa sekoitettavasta komponentista (isosyanaatti ja polyoli). Polymeeri tunkeutuu sepelin joukkoon ja muodostaa lujiteverkon tai siderakenteen, joka sallii halutun määrän muodonmuutoksia. Tyypillisesti polymeerillä täytetään noin 26 % sepelin tyhjätlasta, mikä jättää vielä sepelin riittävän avoimeksi kuivatuksen kannalta. Polymeerin koostumusta voidaan muuttaa sen mukaan millaiset ominaisuudet sepelille halutaan saada ja katalyytin määrällä pystytään säätämään polymeerin tunkeutumissyvyyttä. Yleensä polymeeri sitoutuu 10–15 sekunnin aikana ja noin 90 % lujuudesta kehittyy tunnin kuluessa. Polymeeriä voidaan laittaa esimerkiksi vain tukikerroksen alaosaan tai raiteen reunoille, sillä nämä asennustavat mahdollistavat sepelin tuennan tulevaisuudessa. (Woodward et al. 2009a)

XiTRACK geokomposiitin toiminta perustuu samankaltaiseen kivien sitomiseen toisiinsa kuin tierakenteen asfaltointi. Kun partikkelit on sidottu toisiinsa, alkaa tukikerros toimia yksittäisten kivien sijaan laattana, jolla on myös vetolujuus. Tästä syystä pysyvät muodonmuutokset vähenevät ja myös raidesepelin hienoneminen hidastuu merkittävästi, sillä yksittäiset rakeet eivät hankaa toisiaan vasten samalla tavalla kuin sitomattomassa tukikerroksessa.



Kuva 5.41. XiTRACK polymerin asennusta ja lujitettu tukikerros. (Balfour Beatty Rail 2011)

Woodwardin (2009b) tekemissä FEM -laskennoissa 400 mm XiTRACK kerros 100 mm paksuisen käsittelemättömän sepelin päällä kasvatti radan jäykkyyttä 53 % käsittelemättömään 500 mm sepelikerrokseen verrattuna. Tuotetta on käytetty Iso-Britanniassa yli kymmenen vuoden aikana useissa erilaisissa kohteissa esimerkiksi siltapäädyissä, tasoristeyksissä, vaihteissa, aukean tilan ulottuman pysyvyysongelmissa, tunnelin suuaukoilla, kiintoraiteiden siirtymärakenteissa, raiteen vaakasuunnaisissa pysyvyysongelmissa jne. Tuotteen on havaittu vähentävän merkittävästi kunnossapitotarvetta, sillä se rajoittaa sepelin tiivistymisprosessia ja raepainetta.

Polymeerivahvistetun tukikerroksen ja XiTRACKin etuja valmistajan mukaan ovat (Balfour Beatty Rail 2011):

- antaa sepelille suunniteltavissa olevat ominaisuudet - sepeli ei enää käyttäydy kuin irtonainen kiviaines se vaan muuttuu geokomposiitiksi
- syntyy kolmiulotteinen lujite - ikään kuin geoverkkoja useissa kerroksissa ja joka suuntaan
- mukautuva jäykkyys ja lujuus - kestää toistuvia junakuormia
- helppo asentaa - voidaan asentaa ilman raiteen purkamista
- vahvistaa raiteen stabiiliteettia vaakasuunnassa
- vähentää jäykkyyseroja
- tekee pystygeometriasta tasaisemman
- vähentää roikkuvia pölkkyjä
- lujittuu nopeasti asentamisen jälkeen

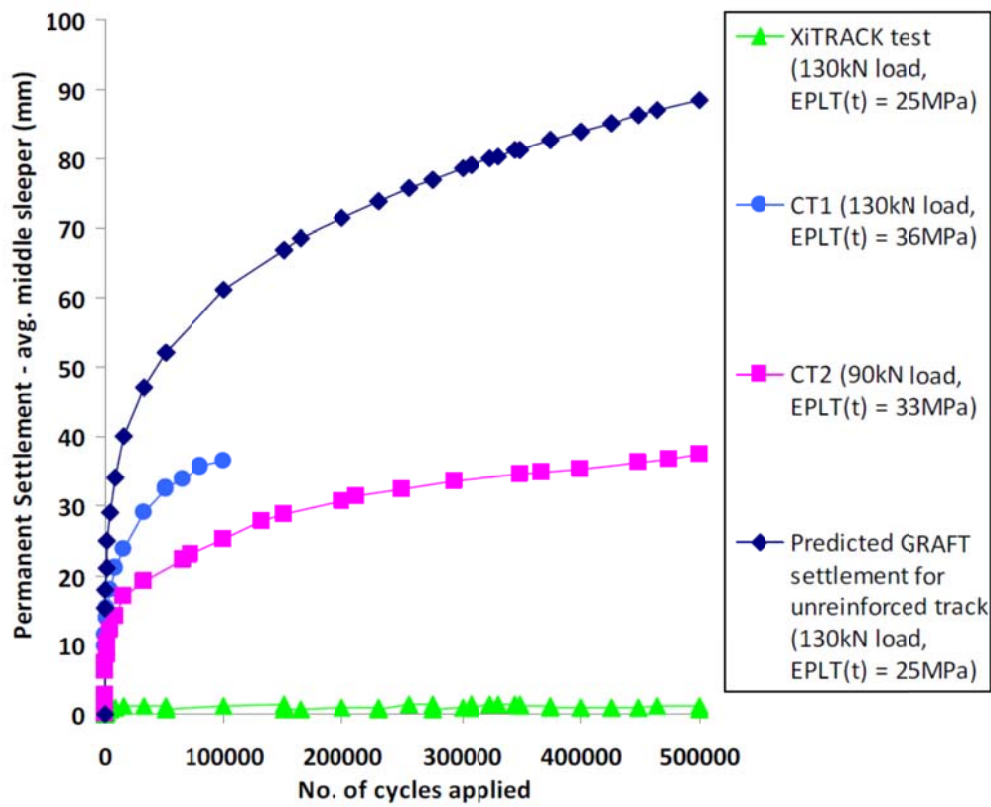
- säilyttää tukikerroksen kuivatusominaisuudet
- turvallinen ympäristölle.

Kennedy (2011) teki GRAFT simulaattorilla syklisiä kuormituskokeita, joissa käytettiin sekä tavallista sepeliä että XiTRACK polymeerillä vahvistettua sepeliä (Kuva 5.42). Kokeissa sepelipaksuus oli 300 mm, ja toisessa kokeessa sepeli oli käsitelty polymeerillä kokonaan. Tulosten mukaan pysyvät muodonmuutokset käsitellyllä tukikerroksella ovat minimaaliset käsittelemättömään tukikerrokseen verrattuna (Kuva 5.43). Tuloksia skaalataan lähteessä myös tarkastellen sitä, miten jäykkä pohjamaan tulisi olla, jotta saavutettaisiin yhtä pienet pysyvät muodonmuutokset XiTRACK tukikerrokseen verrattuna. Näin laskien pohjamaan moduulin pitäisi olla nyt käytetyn 25 MPa:n sijaan 814 MPa eli yli 30 kertaa jäykempi, jotta pysyvät muodonmuutokset jäisivät yhtä pieniksi. Jälkimmäinen vertailu on tosin hieman keinotekoinen, sillä sidottu tukikerros jakaa kuormat eri tavalla kuin sitomaton tukikerros eikä vertailu ole siitä syystä täysin relevantti. Vaikka Kennedyn koejärjestelyssä olisi ollut suuriakin puutteita, tulosten valossa XiTRACK vaikuttaa erittäin käyttökelpoiselta tuotteelta, joka vähentää merkittävästi radan pysyviä muodonmuutoksia.

Koko tukikerroksen käsittävä polymerointi tekee tukikerroksesta yhtenäisen ”monoliitin”, jonka tukeminen saattaa olla hankalaa tai jopa mahdotonta. Tuentatarpeesta ja mahdollisuudesta keskusteltiin Woodwardin (2012) kanssa ja hän oli sitä mieltä, että polymeerillä käsiteltyä kohdetta ei tarvitse enää koskaan tukea. Woodward ei ottanut kantaa siihen mitä sitten tehdään, jos kuitenkin jostain syystä ilmenee tuentatarvetta.



Kuva 5.42. GRAFT, eli radan kuormituskestävyyden simulaattori, jossa kuormiteaan rataa, jonka tukikerros on käsitelty XiTRACK-polymeerillä (Kennedy 2011).



Kuva 5.43. GRAFT-simulaattorin toistokuormitusten tulokset. Penkereen pysyvä muodonmuutos kasvaa toistokuormituksessa pohjamaan jäykkyyden pienentyessä. XiTRACK-polymeerillä käsitelty tukikerros käytännössä poisti pysyvien muodonmuutosten syntymisen (Kennedy 2011).

6 Yhteenveto

6.1 Päätelmät

Radan kokonaisjäykkyys on suure, joka kuvastaa radan kuormituskestävyyttä. Kokonaisjäykkyyden perusteella voidaan määrittää radalta kohtia, joihin on suurempi todennäköisyys syntyä pysyvää muodonmuutosta ja lisääntyvää kunnossapitotarvetta. Kokonaisjäykkyyttä mitataan palautuvan painuman eli kuormasta aiheutuvan kiskon taipuman tai vaihtoehtoisesti pölkyn pystysuuntaisen liikkeen avulla. Palautuva painuma on kokonaisjäykkyyteen nähden kääntäen verrannollinen - kun palautuva painuma kasvaa, kokonaisjäykkyys pienenee. Kokonaisjäykkyyden ollessa hyvin pieni, penkereeseen syntyvien pysyvien muodonmuutosten todennäköisyys kasvaa. Myös kiskot ja pölkyt joutuvat suuren rasituksen alaiseksi, sillä suuri taipuma väsyttää kiskoja ja suuret muodonmuutokset muokkaavat tuentaa siten, että pölkyt alkavat kantaa yhä suuremman osan kuormasta keskiosallaan. Kokonaisjäykkyyden ollessa hyvin suuri, kiskot jakavat kuormat pienemmälle alalle ja yksittäinen ratapölkky kohtaa suuremman kuormituksen. Myös tukikerroksen kuormitukset kasvavat, mikä saattaa aiheuttaa nopeampaa tukikerroksen hienonemista ja tukikerroksen tiivistymisestä aiheutuvat muodonmuutoksen lisääntyvät. Optimitilanteessa kokonaisjäykkyys on keskimääräinen ja vaihtelee vain vähän ja riittävän hitaasti radan pituussuunnassa. Monet radan epäjatkuvuuskohdat, kuten sillat, tasoristeykset, routalevyt ja kallioleikkauksen alkamiskohdat yms., aiheuttavat nopeita jäykkyyksmuutoksia, jotka lisäävät liikku-
kuvan kaluston dynaamisia kuormituksia, ja nämä edelleen lisäävät radan kuormituksia muutoskohtien läheisyydessä. Epäjatkuvuuskohtiin syntyy hyvin todennäköisesti myös pysyvää muodonmuutosta ajan kuluessa.

Kokonaisjäykkyyttä voidaan mitata pistemäisesti muun muassa kiihtyvyyssantureilla tai kovaan pohjaan asennettujen kairatankojen suhteen siirtymäantureilla. Nämä menetelmät soveltuvat mittaamiseen sekä kiskosta että pölkystä, mutta kiskosta kiihtyvyyssantureilla mittaaminen on mittausteknisesti hankalampaa kiskon välittämien suurten taajuuksien takia. Pistemäiset mittaukset eivät sovellu käytettäväksi laajassa mittakaavassa, mutta ovat hyvä apu esimerkiksi jatkuvan mittauslaitteen kalibroinnissa ja mittaustulosten oikeellisuuden varmistamisessa.

Tässä projektissa on kehitetty jatkuvasti mittaava radan jäykkyyden mittalaite. Mittalaite koostuu kolmesta kevyestä akselist, jotka muodostavat mittapisteen jäykkyyksmittausta varten. Mittalaite kiinnitetään TKA7:n akseliin siten, että kiinnityspiste on suoraan akselin alapuolella jousittamattomassa massassa. Mittaus perustuu mitta-kantamittaukseen, jossa mitataan radan pystysuuntaista korkeuspoikkeamaa TKA7:n kuormittamana ja mittalaitteen kuormittamana. TKA7:n akselipaino on 140 kN ja mittalaitteen akselipaino 2–3 kN. Radan palautuva painuma lasketaan kuormitetun ja kuormittamattoman mittauksen erotuksena. Mittalaitteen suhteellinen tarkkuus on teoriassa selvästi parempi kuin 0,1 mm palautuvana painumana ilmoitettuna, ja tämä taso voidaan parhaimmillaan myös käytännössä saavuttaa. Myös mittaustulosten toistettavuus on erittäin hyvä. Suhteellinen tarkkuus kuitenkin vaihtelee eri virhelähteiden takia. Tällaisia virhelähteitä ovat mm. kaluston kulkuominaisuudet, kaarteiden vaikutus mittalaitteeseen, mittalaitteiston värähtelyt ja kiskoilla oleva lumi. Nämä heikentävät suhteellista tarkkuutta hetkittäin selvästi. Värähtelyt ja lyhyen aallonpituuden ilmiöt voidaan suodattaa pois mittausdatasta, mutta esimerkiksi kaarteiden vaikutus on hankalammin poistettavissa. Prototyypivaiheen mittaustulosten tulkin-

nassa onkin kiinnitettävä huomiota näihin mittauksen kannalta toissijaisiin, mutta mittaustuloksiin joskus selvästi vaikuttaviin virhelähteisiin. Suhteellinen tarkkuus on eri mittauskertojen välillä aina yhtä suuri. Sen sijaan palautuvan painuman absoluuttinen taso pitää määrittää jollakin toisella menetelmällä joka kerta uudelleen, kun mittalaite kiinnitetään vetokalustoon. Kiihtyvyyssanturit soveltuvat kalibrointiin kohtalaisen hyvin, kunhan kalibrointipaikka valitaan helposti paikannettavaan radan kohtaan, jossa palautuvan painuman oletetaan olevan kohtalaisen vakio.

Jatkuvan mittalaitteen mittaustuloksista voidaan helposti havaita radan kohdat, joissa on roikkuvia ratapölkkyjä tai ratapölkkyjen tuenta on keskimääräistä heikompi. Mittalaitteen värähtelyiden suodatuksen takia yksittäisten ratapölkkyjen palautuvan painuman havaitseminen vaatii melko pienen mittausnopeuden 10 km/h. Mittalaitetta on testattu useilla ajonopeuksilla aina 50 km/h saakka. Suurella ajonopeudella yksittäisten pölkkyjen vaikutus häviää suodatukseen, mutta pidemmän aallonpituuden ilmiöt ja palautuvan painuman taso havaitaan edelleen. Usein on perusteltua käyttää mittaustulosten suodatuksessa vähintään 3 metrin pituista liukuvaa keskiarvoa, sillä ilman suodatusta mittaustulosten tulkinta on hankalaa.

Jatkuvalla mittausmenetelmällä mitattu palautuvan painuman taso vaihtelee eniten siirryttäessä raidetyypiltä toiselle. Betonipölkkyraiteella palautuva painuma on pienin ja se kasvaa selvästi siirryttäessä puupölkkyraiteille. Jälkimmäisissä myös pölkkyjen ja kiinnitysten kunnolla vaikuttaisi olevan suuri merkitys palautuvan painuman arvoon, kuten myös rakennekerrosten paksuudella. Tämä raiteiden välinen ero on ehkä kaikkein tärkein asia huomata mittaustulosten tulkinnassa. Raidetyyppi voi vaikuttaa palautuvan painuman arvoon jopa yli 4 mm, kun kaikki muut vaikuttavat asiat roikkuvia pölkkyjä ja kiskoatkoksia lukuun ottamatta ovat pääraiteella suuruusluokassa alle 1 mm. Käytännössä mittaustulosten tehokas tulkinta edellyttää vähintäänkin videon yhdistämistä mittausdataan, mutta vasta rakennekerrostiedon ja radan epäjatkuvuuskohtien yhdistäminen alkaa synnyttää todellista kokonaiskuva radan käyttäytymisestä.

Kirjallisuushavaintojen mukaan radan kuormituskestävyys eli pysyvien muodonmuutosten syntyminen liikennekuorman vaikutuksesta määräytyy pitkälti palautuvan painuman perusteella. Suurimmaksi vaikuttavaksi tekijäksi arvioidaan aina pohjamaa. Kehitetty mittalaite havaitsee myös pohjamaasta tulevat jäykkyysvaihtelut, mutta niiden osuus kokonaisvaihtelusta on suhteellisen pieni. Esimerkiksi turvepehmeiköt eivät selvästi erotu mittausdatassa pääraiteilla. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että mittauksessa käytetty kuorma ei ole riittävä tuottamaan pehmeään pohjamaahan suurta muodonmuutosta vaan kuorma jakaantuu lähes kokonaan ratapenkereeseen. Ilmiötä tukevia havaintoja on tehty myös pistemäisillä mittausmenetelmillä, jotka korreloivat hyvin jatkuvan mittauksen tulosten kanssa. Toinen syvällä rakenteessa tapahtuvien muodonmuutosten havaitsemista rajoittava seikka liittyy käytettävään kolmen metrin akseliväliin. Jos kuormasta aiheutuva taipumasuppilo toteutuu edellä mainittua laajempaan, ei siitä aiheutuvaa palautuvaa painumaa saada jatkuvalla menetelmällä kokonaisuudessaan selville. Vähäliikenteisillä radoilla pohjamaan ominaisuudet vaikuttavat mittaustuloksiin selvästi enemmän, sillä ohuen ja heikkolaatuisen päällysrakenteen takia suurempi osa muodonmuutoksista tulee aidosti pohjamaasta ja palautuvan painuman taso on myös suurempi. Kokonaisjäykkyyden avulla ei pystytä määrittämään pelkästään pohjamaasta tulevaa muodonmuutosta, vaan mittaus pitäisi tehdä usealla erilaisella akselipainolla, jotta voitaisiin eritellä tuentatilan, ratapenkereen ja pohjamaan ominaisuuksien vaikutus.

Radan kokonaisjäykkyuden modifiointiin on olemassa useita erilaisia menetelmiä, sillä rata on kokonaisuus ja kaikki komponentit vaikuttavat radan toimintaan. Kokonaisjäykkyyttä voidaan helpoiten muokata raiteen tasolla. Vaihtamalla puupölkyt uusiin tai betonisiin pölkkyyhin, kokonaisjäykkyyden taso kasvaa merkittävästi. Tällä ei ole kuitenkaan varsinaisesti vaikutusta ratapenkereen tai pohjamaan kuormituskestävyyteen. Pohjaimien avulla kokonaisjäykkyyttä voidaan pienentää esimerkiksi silloilla tai kalliroleikkauksissa. Pohjaimilla voidaan vähentää myös runkomelua ja korrugaa-tiota jyrkissä kaarteissa. Kokonaisjäykkyyden vaihtelua on helpointa vähentää pois-tamalla epäjatkuvuuskohtia, kuten sidekiskoatkoksia. Tukikerroksen tasolla suurin muutospotentiaali on tukeutumattomissa pölkyissä. Hyvä tuenta, jonka säilymistä voidaan edistää esimerkiksi tukikerroksen pohjalle asennettavalla geoverkolla, pois-taa merkittävän osan kokonaisjäykkyyden vaihtelusta. Epäjatkuvuuskohtien poistami-seen on kehitetty muun muassa XiTRACK polymeeri, jonka avulla tukikerroksesta voi-daan tehdä geokomposiitti, mikä vähentää muodonmuutosten syntymistä merkittä-västi. XPS-routalevyt alentavat hieman kokonaisjäykkyyttä, joten niiden käyttäminen saattaa siten myös pienentää radan kuormituskestävyyttä, vaikka routahaitat poistui-sivatkin. Aikaisemmin käytettyjen EPS-routalevyjen jäykkyys on vielä kertaluokkaa alhaisempi ja niiden käytöllä on selkeästi negatiivinen vaikutus radan kuormituskes-tävyyteen. Kokonaisjäykkyyden kasvu useimmiten lisää radan kuormituskestävyyttä vaikka poikkeuksiakin löytyy. Esimerkiksi geoverkon avulla on pystytty pidentämään tuentaväli jopa 3–5-kertaiseksi, vaikka geoverkko ei ainakaan merkittävästi vaikuta kokonaisjäykkyyteen. Järeät penkereeseen kohdistuvat toimenpiteet, kuten radan-parannuskoneen käyttö, voi olla perusteltua, jos ratapenger materiaalit ovat heikko-laatuisia tai niitä ei ole riittävästi. Väli- ja eristyskerroksen yläosan parantamisella ei Suomen oloissa kuitenkaan välttämättä pystytä radan ominaisuuksia ratkaisevasti parantamaan, sillä rakennettuja rakennekerroksia on jo entuudestaan radoissa kohta-laisen paljon. Pohjamaahan kohdistuvat toimenpiteet ovat hankalia toteuttaa ja ne vaativat käytännössä liikenteen totaaliatkon.

6.2 Jatkotutkimustarpeet

- Jäykkyys on yksi parametri, jonka avulla voidaan arvioida geometriavirheiden syitä. Jäykkyystieto tulisi olla suunnittelijoiden käytössä, kun arvioidaan geometriavirheiden korjauskeinoja.
- Jatkovatimisen mittalaitteen mittaustulosten tulkintaan ei ole vielä olemas-sa ohjetta tai raja-arvoja, joiden perusteella mittaustuloksia pystyttäisiin täy-simääräisesti hyödyntämään. Tarve olisi kehittää ainakin jäykkyyden muu-tosnopeuden raja-arvot, joiden perusteella kunnossapitoa pystyttäisiin suun-nittelemaan ja kohdentamaan kustannustehokkaasti.
- Jatkovatimisessa mittalaitteessa käytetty 140 kN kuorma havaittiin liian pieneksi, jotta mittausmenetelmällä pystyttäisiin kunnolla havaitsemaan pohjamaan ominaisuuksia paksujen rakennekerrosten läpi. Mittalaitetta olisi tarve kehittää siten, että mittauksessa voitaisiin käyttää suurempaa kuormi-tusta ja kuormitusta pystyttäisiin vaihtelevaan.
- Päällysrakenteeseen kohdistuvien modifiointimenetelmien (geokomposiitti, geoverkko ja pohjain) käyttöönotto edellyttää koerakenteiden rakentamista ja laboratoriotutkimuksia, jotta niiden tarjoama hyöty saadaan selville ja osa-taan hyödyntää.

- Välilevyn jousto-ominaisuudet ovat merkittävässä roolissa kuormitusten jakautumisen ja iskunvaimennuksen kannalta varsinkin talvella. Suomen olosuhteita varten välilevyn ominaisuudet tulisi optimoida siten, että riittävä jousto saavutetaan talvella, mutta myös riittävä jäykkyys kesähelteillä.
- Pohjainten käyttöönotto olisi perusteltua suuren kokonaisjäykkyyden kohteissa, kuten vaihteissa, tunneleissa ja kallioleikkauksissa. Käytettävät pohjaimet tulisi optimoida laskennallisesti siten, että jäykkyysvaihtelut jäisivät mahdollisimman pieniksi.
- Jäykkyyksmittauksissa on havaittu, että siltapäädyt erottuvat toisinaan selvästi heikomman jäykkyyden takia. Siltapäätien geometrian pysyvyysongelmaan tulisi kehittää uusia ratkaisuja esimerkiksi jäykkyyden modifiointitekniikoiden avulla.

Lähteet

- Asmussen. B. 2011. State of the art review of mitigation measures on track. RIVAS/UIC. 30.9.2011. p. 30.
- Auer. F., Potvin. R., Godart. P., Schmitt. L. 2013. Under Sleeper Pads in Track - the UIC project. European Railway Review, Issue 2, pp. 26-32.
- Banimahd M., Woodward P., Kennedy J. & Medero G. 2011. Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions. Proceedings of the ICE - Transport, Volume 165, Issue 3, June 2011, pp. 205 - 214.
- Balfour Beatty Rail, 2011. XiTRACK Polyurethane Ballast Reinforcement. Esitemateriaali www.bbrail.co.uk (saatavilla 30.10.2011).
- Beczowski, H. 2002. Track substructure renewal on Polish State Railways. Rail Engineering International Edition 2002 Number 2.
- Berggren, E. 2009. Railway Track Stiffness, Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. PhD Thesis. Stockholm 2009. Royal Institute of Technology (KTH), Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Rail Vehicles. 123 p.
- Bolmsvik, R. 2011. Utvärdering av RSMV-mätning i Gimo 2010 för skarvspår med slumpvis inblandning av TCS, Abetong, Växjö 2011.
- EN 13481-2. 2002. Railway applications. Track. Performance requirements for fastening systems. Part 2: Fastening systems for concrete sleepers. European committee for standardization.
- Esveld C. 2001. Modern Railway Track, Second Edition. MRT-Productions. ISBN 90-800324-3-3.
- Getzner. 2013a. Sleeper pads for ballasted track. Esittelyaineisto. p.15.
- Getzner. 2013b. Esittelytilaisuus Tampereen teknillisellä yliopistolla. 21.2.2013.
- Fimor. 2013. Esittelyaineisto. Saatavilla: <http://www.fimor.fr/SFF/english.html>. Viitattu 6.10.2013.
- Fröhling, R., D. 1997. Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness. Eng.D Thesis. University of Pretoria, Faculty of Engineering. 149 p.
- Indraratna, B. & Salim, W. 2005. Mechanics of ballasted rail tracks; A geotechnical perspective. London, Taylor & Francis. 226 p.
- Ishikawa, T. 2005. Effect evaluation of particle shape on cyclic deformation of railroad ballast. Technical report by Japanese domestic committee on geotechnics of particulate media technical committee (TC35). The Japanese Geotechnical Society. Pp. 6-31 - 6-37.

Kalliainen A. & Kolisoja P. 2013. Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2013. 85 s. ja 2 liitettä.

Kauppinen M. 2011. Ratakiskon elinkaari. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. 113 sivua.

Kennedy J. 2011. A full-scale laboratory investigation into railway track substructure performance and ballast reinforcement. Doctoral Thesis. Heriot-Watt University School of Built Environment. 274 p.

Kwan C. 2006. Geogrid reinforcement of railway ballast. Doctoral thesis, University of Nottingham.

Liikennevirasto 2012. Geolujitetut maarakenteet, Tiegeotekniikan käsikirja. Liikenneviraston oppaita 2/2012.

Loy. H. 2008. Under sleeper pads: improving track quality while reducing operational costs. European Railway Review, Issue 4. p. 6.

Loy. H. 2009. Under Sleeper Pads in Turnouts. Railway Technology Review. Volume 49, pp. 35-38.

Loy. H. 2012. Mitigating vibration using under-sleeper pads. Railway Gazette International 4/2012. pp. 40-42.

Müller-Boruttau. F.H., Kleinert. U., 2001. Sleeper with sole pads. WCRR 2001. p.6.

Nurmikolu A. & Kolisoja P. 2001. XPS-routaeristelevyt ratarakenteissa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot, RHK:n julkaisuja A2/2001.

Nurmikolu A. & Kolisoja P. 2002. EPS-routalevyt ratarakenteessa, kuntotilan arviointi rataosalta Orivesi - Jämsänkoski km 238+580 ja 239+100 otetuista näytteistä. Tutkimusraportti, Tampereen teknillinen yliopisto. 14 s.

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2010. Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. 64 s + 3 liitt.

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2011. Mechanism and effects of railway ballast degradation. Proceedings of International Symposium on Railway Geotechnical Engineering, GEORAIL 2011, May 19-21, 2011, Paris, France. 10 p.

Peltokangas. O. Luomala. H. Nurmikolu. A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikenneviraston julkaisuja ja selvityksiä. 6/2013. 190 s. + 4 l.

Peltonen. T., Backholm. M. 2009. Raideliikenteen runkomelun tutkimuksia, USP-radan eristävyysmittaukset. Helsinki 2009. Insinööritoimisto Akukon Oy. 7 s. + liitt. 11 s.

Perpinya. X. 2012. Reliability and safety in railway. InTech, ISBN 978-953-51-0451-3, p. 418.

Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11: Radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.

Lundqvist, A. & Dahlberg, T. 2005. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol. 219. No. 2. pp. 67-77.

Müller. R. 2007. Mitigation Measures for Open Lines against Vibration and Ground-Borne Noise: A Swiss Overview. Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, Sept 4-8 2007. pp 264-270.

Read, D., Chrismer, S., Ebersohn, W. & Selig, E. 1994. Track Modulus Measurements at the Pueblo Soft Subgrade Site. Washington D.C. Transportation Research Record 1470. pp. 55-64.

Ricardo. I., Salvador. P., Inarejos. J., Medina. L. 2013. Analysis of the performance of under-sleeper pads in high-speed line transition zones. Proceedings of the ICE - Transport, Volume 167, Issue 2, April 2013 pp 63-77.

Saarinén, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 7/2008. 75 s. + 4 l.

Sateba. 2013. Saatavilla: <http://www.sateba.com/article204.html>. Viitattu 15.8.2013.

Schneider. P., Bolmsvik. R., Nielsen. J. C. O. 2011. In situ performance of a ballasted railway track with under sleeper pads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Apr 28. 2011. pp. 299-309.

Schmid. F. (ed.). 2010. Best Practice in Wheel-Rail Interface Management for Mixed Traffic Railways. First Edition. Birmingham 2010. University of Birmingham Press, A & N Harris. 500 p.

SFS-EN 13146-9. 2011. Railway applications. Test methods for fastening systems. Part 9: Determination of stiffness. European committee for standardization.

Skoglund, K. A. 2002. A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design. Eng.D Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Engineering and Technology. 160 p., 37 app.

Steidl M. 2010. Mixed Traffic and High Speed. Arema 2010 Annual Conference and Exposition.

Tunna. J. 2010. Haastattelut helmikuussa 2010 TTY:lla Tampereella.

UIC. 2009. Project - Under Sleeper Pads - Summarising Report p.1-40 (4th Edition). 26.3.2009. 40 p.

UIC CODE 713. 2004. Design of monoblock concrete sleepers. 1st edition, November 2004.

Viitala T. 2011. RASU 2011 opintomateriaali.

VR Track. 2011. Jatkuvakiskoraidetekniikka. Hitsausyksikkö/koulutushitsaamo. 7.4.2011.

Wangqing, W., Geming, Z., Kaiming, L. & Lin, L. 1997. Development of Inspection Car for Measuring Railway Track Elasticity. Proceedings of 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town, South Africa, 1997.

Witt. S. 2008. The influence of under sleeper pads on railway track dynamics. Linköping University. 16.6.2008. 48 p.

Woodward, P. K., Kennedy, J. H., Medero, G. M. 2009a. Three dimensional track reinforcement using polymer geocomposites. Proceedings of the American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA), Chicago, USA.

Woodward, P. K., Kennedy, J. H. and Medero, G. M. 2009b. Reinforcing railway tracks using insitu polymer geocomposites. Proceedings of GIGSA GeoAfrica Conference, Cape Town, South Africa.

Woodward P.K. 2012. Suullinen keskustelu 10.9.2012.

